

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr  
**Martin Gruber**

**Machbarkeitsstudie über die  
Umstellung eines mineralöl-  
gefüllten Transformators auf  
pflanzenbasierte  
Isolierflüssigkeiten**

Mittweida, 2017



# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Machbarkeitsstudie über die Umstellung eines mineralöl- gefüllten Transformators auf pflanzenbasierte Isolierflüssigkeiten**

Autor:

**Herr Martin Gruber**

Studiengang:

**Elektrotechnik- Energietechnik**

Seminargruppe:

**KE13wWA-F**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig**

Zweitprüfer:

**Dipl.-Ing. Dr. Ernst Pagger**

Einreichung:

**Mittweida, 10.08.2017**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2017**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Gruber, Martin:

Machbarkeitsstudie über die Umstellung eines mineralölgefüllten Transformators  
auf pflanzenbasierte Isolierflüssigkeiten –2017

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektrotechnik, Diplomarbeit, 2017

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Machbarkeit der Umstellung des Isolieröls von herkömmlichen Mineralöl auf biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten. Das Hauptziel ist es eine Aussage treffen zu können ob Transformatoren, welche bereits seit Jahren mit Mineralöl gefüllt in Betriebs sind, ohne größeren Aufwand auf biologische Isolierflüssigkeiten, speziell auf natürlichen Ester umgestellt werden können. Um vor allem in Ballungszentren eine sicherere Versorgung gewährleisten zu können und den Gefahren eines Transformatorbrandes durch thermische Überlastung entgegen zu wirken. Dazu werden technische Betrachtungen in Hinsicht auf elektrische und thermische Beanspruchungen angestellt und analysiert.

# Inhalt

## Inhalt VI

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>2</b>
1.1 Problemstellung .....	3
1.2 Zielsetzung .....	4
<b>2 Theoretischer Teil .....</b>	<b>5</b>
2.1 Wirkungsweise von Transformatoren .....	5
2.2 Kern .....	8
2.3 Wicklung .....	11
2.3.1 Lagenwicklung .....	11
2.3.2 Scheibenspulenwicklung .....	12
2.3.3 Folienwicklung .....	13
2.4 Verlustleistung .....	13
2.5 Ausführungsformen von Transformatoren .....	14
2.5.1 Einphasentransformator/Kleintransformatoren .....	14
2.5.2 Drehstromtransformatoren .....	15
2.6 Schutzeinrichtungen .....	16
2.6.1 Buchholzschutz- Relais .....	16
2.6.2 Gasanalyse im Labor .....	17
2.6.3 Monitoring-Systeme .....	18
2.6.4 Online GC-Analysen .....	19
<b>3 Isolationssysteme für Transformatoren .....</b>	<b>21</b>
3.1 Transformatoren mit Öl-Board-Isolation .....	21
3.2 Trockentransformatoren .....	23
3.2.1 Gießharztransformatoren .....	23
3.2.2 Gasisolierte Transformatoren .....	24
3.2.3 Kabeltransformatoren .....	24

3.2.4	Supraleitende Transformatoren .....	25
3.2.5	Drosseln .....	25
<b>4</b>	<b>Isolierflüssigkeiten .....</b>	<b>27</b>
4.1	<i>Funktion der Isolierflüssigkeit .....</i>	<i>27</i>
4.2	<i>Elektrische Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten .....</i>	<i>29</i>
4.2.1	Elektrische Leitfähigkeit/ spezifischer Widerstand .....	29
4.2.2	Dielektrizitätszahl .....	31
4.2.3	Elektrische Durchschlagfestigkeit .....	32
4.2.4	Dielektrischer Verlustfaktor .....	33
4.3	<i>Physikalische Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten .....</i>	<i>38</i>
4.3.1	Pourpoint .....	38
4.3.2	Wärmeleitfähigkeit .....	38
4.3.3	Spezifische Wärmekapazität .....	39
4.3.4	Viskosität .....	41
4.4	<i>Chemische Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten .....</i>	<i>43</i>
4.4.1	Flammpunkt .....	43
4.4.2	Brennpunkt .....	43
4.4.3	Wassergehalt .....	45
4.4.4	Grenzflächenspannung .....	45
4.5	<i>Biologische Eigenschaften .....</i>	<i>46</i>
4.5.1.1	Zusammenfassung der Kennwerte .....	48
<b>5</b>	<b>Umsetzung .....</b>	<b>49</b>
5.1	<i>Kompatibilität der verwendete Stoffe im Transformator .....</i>	<i>49</i>
5.1.1	Eisenkern/ Öltank .....	49
5.1.2	Kupferwicklung .....	50
5.1.3	Dichtungen .....	51
5.1.4	Zellulose Material .....	51
5.2	<i>Einfluss auf das Kühlsystem .....</i>	<i>53</i>
5.2.1	Dielektrische Konstruktionsüberlegungen .....	53
5.2.2	Thermische Konstruktionsüberlegungen .....	53
5.2.3	Pumpenleistung .....	56
<b>6</b>	<b>Erkenntnisse und Ausblick .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>61</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>69</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirbelstromverluste Unterschied zwischen Eisenkern und geschichteten kornorientierten Blechen (6).....	9
Abbildung 2: geblechter Transformatorkern aus Dynamoblech (während Fertigung) (9) ...	9
Abbildung 3: Temperaturmodell eines Transformators nach 1 EC 60354 (8) .....	10
Abbildung 4: 3-Schenkelkern-Transformator mit Schnitt durch die Wicklung (9) .....	11
Abbildung 5: Wicklungsschema der Lagenwicklung (1 S. 443).....	12
Abbildung 6: Wicklungsschema der Scheibenwicklung (1 S. 443).....	12
Abbildung 7: Wicklungsschema der Folienwicklung (1 S. 443).....	13
Abbildung 8: Einphasentransformator aus einem Overheadprojektor (11) .....	14
Abbildung 9: Transformator mit herausgehobenem Aktivteil (12) .....	15
Abbildung 10: Dreischenkelkern 120° versetzt ohne mittleren Schenkel .....	16
Abbildung 11: schematische Darstellung des Buchholzschutz-Relais (13).....	17
Abbildung 12: Färbung der Öle (15).....	18
Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau der verschiedenen Transformatortypen, hier zu sehen ein Einphasentransformator (1 S. 353).....	21
Abbildung 14: Aufbau der Isolierung eines Leistungstransformators (21).....	22
Abbildung 15: Gießharztrockentransformator (1250 kVA; 10/0,4 kV) (27) .....	24
Abbildung 16: automatische Kühlung durch natürliche Konvektion (entnommen aus (29 S. 11)) .....	27
Abbildung 17: erzwungene Ölumwälzkühlung (entnommen aus (29 S. 5)).....	28
Abbildung 18: Leiter zur Veranschaulichung der Gleichung für die elektrische Leitfähigkeit (31) .....	29



Abbildung 19: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit bei einer Feldstärke von kV/mm (34) .....	30
Abbildung 20: Auswirkung des Dielektrikums für unterschiedliche Materialien (35) .....	31
Abbildung 21: Serien- und Parallelersatzschaltbild für die Ermittlung des Verlustwinkels (40) .....	34
Abbildung 22: Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit bei 50 Hz und Raumtemperatur (1 S. 251) .....	35
Abbildung 23: Abhängigkeit des Verlustfaktors von Frequenz und Temperatur für ein Dielektrikum mit Orientierungspolarisation .....	35
Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung eines Plattenkondensators (41 S. 120) .....	36
Abbildung 25: Wärmekapazität abhängig von der Temperatur (47) .....	40
Abbildung 26: Couette-Strömung .....	41
Abbildung 27: biologische Abbaubarkeit der einzelnen Isolierflüssigkeiten (63) .....	46
Abbildung 28: CO <sub>2</sub> Emissionen in 30 Jahren (64) .....	47
Abbildung 29: Kupfer - Kupfersulfid (67) .....	50
Abbildung 30: Diagramm der Lebensdauererlängerung des Papiers (70) .....	52
Abbildung 31: Laminare- Turbulente Strömung (73) .....	56
Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur (Daten aus (45)) .....	57
Abbildung 33: Pumpenleistungsabhängigkeit / Viskosität des Fördermediums (68) .....	58
Abbildung 34: Zusammenhang von Pumpenleistung zu Viskosität bei 120m <sup>3</sup> /h (adaptiert aus (68)) .....	58

## Formelverzeichnis

Formel 1 .....	5
Formel 2 .....	5
Formel 3 .....	6
Formel 4 .....	6
Formel 5 .....	29
Formel 6 .....	32
Formel 7 .....	33
Formel 8 .....	34
Formel 9: .....	35
Formel 10 .....	36
Formel 11 .....	37
Formel 12 .....	37
Formel 13 .....	38
Formel 14 .....	41
Formel 15 .....	42
Formel 16 .....	42
Formel 17 .....	42
Formel 18 .....	54
Formel 19 .....	55
Formel 20 .....	55
Formel 21 .....	55

---

Formel 22.....	56
----------------	----

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: thermische Eigenschaften .....	39
Tabelle 2: Thermische Eigenschaften der Isolierflüssigkeit (Werte lt. (39) (38) .....	44
Tabelle 3.....	48

## Abkürzungsverzeichnis

<b>MVA</b>	Mega Voltampere – Maßeinheit für elektrische Scheinleistung
<b>kVA</b>	kilo Voltampere
<b>PCB</b>	polychlorierte Biphenylen
<b>PCT</b>	polychlorierte Terphenyle
<b>U</b>	elektrische Spannung [Volt,V]
<b>R</b>	Widerstand [ $\Omega$ ]
<b><math>\tan \delta</math></b>	Verlustfaktor [1]
<b><math>\delta</math></b>	Verlustwinkel [ $^\circ$ ]
<b><math>\varphi</math></b>	Phasenwinkel [ $^\circ$ ]
<b><math>I_R</math></b>	Wirkstrom [A]
<b><math>I_C</math></b>	Blindstrom [A]
<b><math>P_R</math></b>	Wirkleistung [W]
<b><math>Q_c</math></b>	Blindleistung [var]
<b><math>\omega</math></b>	Kreisfrequenz [ $s^{-1}$ ]
<b>C</b>	Kapazität [F]
<b>W</b>	materialspezifische Aktivierungsenergie [J]
<b>K</b>	Boltzmann-Konstante [J/K]
<b><math>\kappa</math></b>	elektrische Leitfähigkeit [ $1/\Omega m$ ]
<b><math>\kappa_0</math></b>	Grundleitfähigkeit [ $1/\Omega m$ ]
<b>T</b>	Temperatur [K]



# Kapitelübersicht

Diese Diplomarbeit besteht aus insgesamt 6 Kapiteln.

Nach der allgemeinen Einleitung in **Kapitel 1**, in welchem die Problemstellung und die Zielstellung erörtert werden, werden in **Kapitel 2** die physikalischen Grundlagen und die verschiedenen Transformatortypen erläutert. Dieses Elementarwissen soll der gesamten Arbeit als Grundlage dienen.

Anschließend werden in **Kapitel 3** die am häufigsten verwendeten Transformatoren aufgelistet und es wird auf die grundlegenden Unterschiede ihrer Isolationssysteme eingegangen.

In **Kapitel 4** werden elektrische, physikalische und chemische Kennwerte von Isolierölen erklärt und es werden einzelne Kennwerte von Mineralöl und natürlichem Ester gegenübergestellt. Des Weiteren wird auf die Notwendigkeit des Kühlsystems eingegangen und die Funktionsweise der unterschiedlichen Kühlarten beschrieben.

Im Hauptteil der Diplomarbeit (**Kapitel 5**) wird die Kompatibilität der einzelnen Bauteile des Transformators untersucht. Aufgrund der Daten eines bereits mit Mineralöl betriebenen Transformators wird die Kühlleistung nach einer Umstellung auf natürlichen Ester nachgerechnet, um eine Aussage über die Machbarkeit der Ölumstellung treffen zu können.

Abschließend erfolgt im **Kapitel 6** eine Zusammenfassung der erworbenen Erkenntnisse und ein Ausblick möglicher weiterer Schritte.

# 1 Einleitung

Die Versorgung mit elektrischer Energie gehört, wie die Wasserversorgung und die Einrichtung leistungsfähiger Verkehrsbedingungen, zu den Grundaufgaben der Infrastruktur einer funktionierenden Volkswirtschaft. Die Elektrotechnik ermöglicht es, beinahe jede Rohenergiequelle auszunutzen. Durch Umwandlung in elektrische Energie kann diese besonders wirtschaftlich und umweltfreundlich zum Verbraucher übertragen werden.

Um möglichst alle Regionen mit elektrischer Energie versorgen zu können, wurde beinahe weltweit ein flächendeckendes Stromnetz aufgebaut. Dieses Netzwerk besteht aus elektrischen Stromleitungen wie Freileitungen und Erdkabeln mitsamt der dazu benötigten Infrastruktur. Der Stromtransport geschieht auf unterschiedlichen Spannungsebenen, um die Übertragung optimieren zu können und die Netzverluste gering zu halten. Durch unterschiedliche Spannungsebenen kann der erforderliche Querschnitt der Stromleitungen angepasst werden und der Aufwand für die Schalteinrichtungen sinkt. Transformatoren stellen dabei das zentrale Bauelement für die Übertragung elektrischer Energie dar und bilden das Bindeglied zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen. Neben einphasigen Transformatoren spielen vor allem die dreiphasigen Hochspannungsleistungstransformatoren eine dominierende Rolle. Sie sind, vor allem in den höchsten Spannungsebenen, strategisch wichtige aber teure Komponenten. (1)

Das zentraleuropäische Stromversorgungsnetz umfasst vier Spannungsebenen. Das Verteilnetz sorgt für die Grobverteilung elektrischer Energie. Von diesem führen Stromleitungen zu Umspannwerken oder großen Industriebetrieben in verschiedenen Regionen und Ballungszentren. Im Mittelspannungsnetz wird die elektrische Energie verteilt und an die regionalen Transformatorenstationen oder größeren Einrichtungen wie Krankenhäuser oder Fabriken weitergeleitet. In den unteren Netzebenen werden Verteiler- und Netztransformatoren im Leistungsbereich von 50 kVA bis 2,5 MVA eingesetzt und dienen der Versorgung der Endverbraucher aus dem Mittelspannungsnetz bei einer Spannung von 230/400V. Transformatoren werden heute von kleinsten Einphasentypen im Wattbereich bis zu Leistungen von 1500 MVA gebaut, wobei vor allem Kleinsttransformatoren zur Versorgung von Steuer- und Regelgeräten dienen. (2)



## 1.1 Problemstellung

Transformatoren sind ein wesentlicher Bestandteil unserer Energieversorgung, um diese effizient und vor allem versorgungssicher betreiben zu können ist es notwendig, dass vorhandene Systeme angemessen gewartet und betrieben werden. Aufgrund zunehmender erneuerbarer elektrischer Energiequellen kommt es zu schnellen Lastwechseln sowie hoher elektrischer und thermischer Beanspruchung von Transformatoren. Durch überlastete oder brennende Transformatoren kommt es vermehrt zu Stromausfällen. Neben der Belastung für die Umwelt durch Emissionen in der Luft, dem Grundwasser und dem Boden, hat zudem jeder unvorhersehbare Ausfall auch enorme wirtschaftliche Folgen.

Transformatoren müssen aufgrund ihres physikalischen Aufbaus permanent gekühlt und mit Isolierflüssigkeit gefüllt sein. In flüssigkeitsgekühlten Transformatoren wird eine dielektrische<sup>1</sup> Flüssigkeit verwendet, um die Wicklung zu kühlen und eine optimale Leistung zu erzielen.

Viele Jahrzehnte wurde zur Isolation Mineralöl verwendet. Dieses ist umfassend erforscht, es liegen ausreichend Erfahrungswerte vor und es sind sämtliche Eigenschaften bekannt; auch die hohe Brandlast und die schlechte biologische Abbaubarkeit, welche als Nachteile zu verstehen sind, werden akzeptiert. Dank dem biologisch abbaubaren Ester soll es in Zukunft jedoch möglich sein, Transformatoren wesentlich abwechslungsreicher belasten bzw. mit höheren Betriebstemperaturen betreiben zu können, ohne der Gefahr eines Transformatorbrandes ausgesetzt zu sein.

Die meisten flüssigkeitsgefüllten Transformatoren, die heutzutage weltweit in Betrieb sind, sind mit Mineralöl gefüllt, da dies im Regelfall die erste Wahl bei Outdoor-Installationen ist. Zudem stellen die anfänglich niedrigen Kosten einen wesentlichen Pull-Faktor dar. Es besteht Kenntnis um die Brennbarkeit und die lange biologische Abbaubarkeit des Mineralöls. Dieser wird mit Hilfe technischer Mittel entgegengewirkt.

Aus Gründen der Nachhaltigkeit ist man bestrebt, die Mineralöle auf lange Sicht durch alternative Isolierflüssigkeiten wie beispielsweise natürliche oder synthetische Esterflüssigkeiten zu ersetzen. Es gäbe zwar Alternativen wie synthetischen Ester, Silikonöl oder Fluorpolymere, welche ebenfalls gute elektrische und thermische Eigenschaften besitzen, jedoch sind die Kosten dieser Flüssigkeiten um ein vielfaches höher. Zudem ist die Abbaubarkeit nicht gegeben, weshalb sie in der Praxis für Leistungstransformatoren nicht in Frage kommen. (3)

---

<sup>1</sup> Dielektrikum ist eine elektrisch nicht leitende oder sehr schwach leitete Substanz (6)

## 1.2 Zielsetzung

Der Fokus dieser Arbeit ist, die Möglichkeit einer Umstellung des Isolieröls eines Transformators zu analysieren. Dazu werden die wesentlichsten Parameter der Isolierflüssigkeit herangezogen und verglichen- im Speziellen wird die Kompatibilität des natürlichen Esters mit den restlichen Transformatormaterialien untersucht. Ziel ist es, Transformatoren in Zukunft mit einem nachhaltigen Isolieröl ausstatten zu können. Man erhofft sich dadurch eine höhere Flexibilität in Puncto elektrischer Belastung zu erreichen, ohne die Lebensdauer des Transformators zu verkürzen.

Fakt ist, dass die Zeit in denen Transformatoren zweimal pro Tag Lastwechsel hatten längst vorbei ist. Die heutige Industrie 4.0 stellt einige Herausforderungen an die Stromverteilungsnetze in Europa. Transformatoren müssen flexiblere Lastflüsse ertragen und werden überall dort errichtet, wo sie notwendig sind. Egal ob in der Nähe von Offshore-Windparks, Photovoltaikparks oder in thermischen Anlagen.

Die meisten Transformatoren befinden sich in besonders ausfallkritischen Positionen der Übertragungskette. Bis auf wenige Ausnahmen handelt es sich dabei um Transformatoren mit einer gemischten Isolierung aus einer hochviskosen Flüssigkeit und getränktem Feststoff. Der Feststoff übernimmt die mechanisch tragenden Eigenschaften und die Flüssigkeit neben der Isolation auch die Aufgabe des Kühlmediums.

Im Zuge einer Umstellung des Isolieröls verändern sich somit nicht nur die Eigenschaften der Isolierung, sondern auch jene der Kühlung. Daher wird im Zuge dieser Studie die Kühlleistung des Transformators aufgrund einiger Parameter untersucht und nachgerechnet. Dadurch soll Erkenntnis darüber erlangt werden, ob herkömmliche Transformatoren grundsätzlich „estertauglich“ sind.

Natürlich werden auch Transformatoren mit reiner Feststoffisolierung (Gießharztransformatoren) oder Gasisolierung (Schwefelhexafluorid-SF<sub>6</sub>) für die Energieverteilung eingesetzt. Da diese aber die Ausnahme darstellen sind sie nicht Bestandteil dieser Arbeit. In den folgenden Kapiteln werden rein technische Untersuchungen für eine möglich Umstellung des Isolieröls angestellt.

## 2 Theoretischer Teil

Im nachfolgenden Kapitel wird auf die physikalischen Grundlagen und auf die wesentlichen Bestandteile des Transformators eingegangen. Grundbestandteile wie Kern und Wicklung werden erklärt sowie unterschiedliche Ausführungsarten von Transformatoren in Abhängigkeit von ihrer Isolierflüssigkeit erörtert.

### 2.1 Wirkungsweise von Transformatoren

Transformatoren wandeln elektrische Energie in eine Energie mit einer anderen Spannung und Stromstärke um. Je nach Leistung spricht man von Klein- oder Großtransformatoren. Einphasentransformatoren bestehen aus zwei Spulen auf einem gemeinsamen Kern aus leicht magnetisierbarem Material. Die Eingangswicklung nimmt Wechselstrom und somit elektrische Energie auf, welche über den magnetischen Wechselfluss an den Eisenkern weitergegeben wird. Da dieser magnetische Fluss Größe und Richtung mit der Frequenz der Eingangsspannung ändert, wird in die Ausgangswicklung eine Spannung induziert, welche die gleiche Frequenz wie die Eingangsspannung hat. Die Leerlaufspannung ist die Spannung, welche an der Ausgangsspule gemessen wird, wenn kein Verbraucher angeschlossen ist. Bei Transformatoren mit Bemessungsleistungen von über 16 kVA gibt man die Leerlaufspannung als Bemessungsspannung an. Die induzierte Spannung berechnet sich basierend auf dem Induktionsgesetz.

$$u_0 = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$u_0$  ... *induzierte Spannung*

$N$  ... *Windungszahl*

$\Delta \Phi$  ... *Änderung des magnetischen Flusses*

$\Delta t$  ... *Zeitliche Änderung*

**Formel 1**

Der Scheitelwert  $\hat{u}_0$  der Leerlaufspannung hängt vom Scheitelwert  $B$  der magnetischen Flussdichte, vom Eisenquerschnitt  $A_{Fe}$  des Kerns, von der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Windungszahl  $N$  ab. Aus der Transformatorhauptgleichung ist ersichtlich, dass die Leerlaufspannung linear mit der Windungszahl ansteigt.

$$U_0 = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe} \cdot f \cdot N$$

$\hat{B}$  ... *magnetische Flussdichte (Scheitelwert)*

$A_{Fe}$  ... *Eisenquerschnitt*

$f$  ... *Frequenz*

**Formel 2**

Wegen der Isolierung der Bleche ist der wirksame Eisenquerschnitt kleiner als der gemessene Kernquerschnitt. Dies wird durch den Eisenfüllfaktor  $f_{Fe}$  berücksichtigt. Je nach Art der Isolierung der Bleche beträgt der Füllfaktor  $f_{Fe}$  etwa 0,8 bis 0,95. Da die beiden Wicklungen magnetisch fest gekoppelt sind, fließt sowohl durch die Eingangs- als auch die Ausgangswicklung derselbe magnetische Fluss. Für die Energieübertragung werden überwiegend magnetisch fest gekoppelte Transformatoren verwendet. Eine 100%-ige Koppelung ohne Verluste ist jedoch nur in der Theorie (beim idealen Transformator) vorhanden, wo gilt:

$$\phi_1 = \phi_2 \rightarrow B_1 * A = B_2 * A \rightarrow \frac{U_1}{f * N_1} * \frac{U_2}{f * N_2} \rightarrow \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

$N_1$  ... *Windungszahl der Eingangswicklung*  
 $N_2$  ... *Windungszahl der Ausgangswicklung*

**Formel 3**

Beim Transformator ohne Belastung verhalten sich die Spannungen wie die Windungszahlen. Das Verhältnis der Eingangsspannung zur Ausgangsspannung nennt man Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$ . Die Bemessungsübersetzung eines Transformators ist das Verhältnis seiner höheren Bemessungsspannung zur niedrigeren Bemessungsspannung. Nur beim idealen Transformator ist die Eingangsleistung  $S_1$  so groß wie die Ausgangsleistung  $S_2$ .

$$S_1 = S_2 \rightarrow U_1 * I_1 = U_2 * I_2 \rightarrow \frac{I_1}{I_2} * \frac{U_2}{U_1} \rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$S_1$  ... *Eingangsleistung*  
 $S_2$  ... *Ausgangsleistung*  
 $U_1$  ... *Eingangsspannung*  
 $U_2$  ... *Ausgangsspannung*  
 $I_1$  ... *Strom durch die Eingangswicklung*  
 $I_2$  ... *Strom durch die Ausgangswicklung*

**Formel 4**

Beim realen Transformator treten Verluste auf. Aus diesem Grund verhalten sich die Ströme nur angenähert umgekehrt wie die Windungszahlen.

Wenn an der Ausgangswicklung keine Last angeschlossen ist, wirkt die Eingangswicklung im Leerlauf wie eine Induktivität und die Ausgangswicklung ist stromlos. Wird eine sinusförmige Eingangswechselspannung angelegt, entsteht ein um 90° nacheilender Magnetisierungsstrom, der einen phasengleichen magnetischen Fluss erzeugt. Als Folge der Flussänderung entsteht in der Ausgangswicklung eine Spannung, die beim idealen Trans-

formator gegenüber dem Magnetisierungsstrom um  $90^\circ$  nacheilend phasenverschoben ist. Beim realen Transformator wird ersichtlich, dass der gegenüber der Spannung verschobene Magnetisierungsstrom eine etwas kleinere Phasenverschiebung hat, da das Ummagnetisieren des Eisenkerns durch den Verluststrom  $I_V$  Wärme erzeugt und damit eine Belastung mit einem Wirkwiderstand darstellt. Wird im Leerlauf eine zu große Spannung angeschlossen, wird vom Kern eine zu große Flussdichte gefordert und ein großer Magnetisierungsstrom ist notwendig. Da der Kern bei der Bemessungsspannung schon annähernd gesättigt ist, steigt der Magnetisierungsstrom stark an und die Wicklung wird thermisch erwärmt, was bis zur Zerstörung führen kann.

In der Wicklung des Transformators fließen je nach Belastung unterschiedliche Ströme und verursachen Verluste in Form von Wärme. Diese entstehen durch den Drahtwiderstand der Wicklung und nehmen mit der Belastung quadratisch zu.

Bei kleinen Transformatoren genügt es, die Wicklung durch Umgebungsluft zu kühlen. Bei Drehstrom-Leistungstransformatoren hingegen wird die Wicklung in einem Ölkessel verbaut, wo sie durch das umliegende Isolieröl gekühlt wird. Isolieröle kühlen wesentlich besser als Luft - sie isolieren zugleich und die Hygroskopizität<sup>2</sup> wird beschränkt.

---

<sup>2</sup> Beschreibt die Eigenschaft von Stoffen, Feuchtigkeit aus der Umgebung meist in Form von Wasserdampf aus der Luftfeuchtigkeit zu binden

## 2.2 Kern

Der Transformatorkern hat die Aufgabe, den Wechselfluss zu führen und die Wicklungen zu tragen. Er hält die Teile mechanisch zusammen, darf jedoch nicht zu massiv sein, da sonst die Wirbelstromverluste unzulässig groß werden. Kleine Transformatoren sind entweder mit oder ohne Kern ausgeführt. Je nach Einsatzgebiet werden Eisen oder Ferritkerne verwendet. Wesentlich ist, dass sich ein ferromagnetisches Material im Spulenkern befindet, da es eine wesentlich bessere magnetische Leitfähigkeit als Luft besitzt. Nur so kann sich ein möglichst gleichmäßiger und starker magnetischer Fluss einstellen. Ein Nachteil von Ferritkernen ist, dass ab einer bestimmten magnetischen Flussstärke der Kern in Sättigung<sup>3</sup> gelangt und sich die magnetische Leitfähigkeit reduziert. Dadurch kommt es zu einem nichtlinearen Übertragungsverhältnis und zur thermischen Erwärmung des Kerns. (4)

Bei Verteiltransformatoren wird überwiegend Dynamoblech<sup>4</sup> verwendet. Dieses hat durch seinen großen Eisen- und Siliziumanteil sehr gute ferromagnetische Eigenschaften in der Höhe von 1,5 bis 2 Tesla<sup>5</sup>. Luft hat im Vergleich dazu nur eine magnetische Flussdichte von  $5 \cdot 10^{-5}$  Tesla.

Bei Elektroblechen wie beispielsweise Dynamoblech, wird durch Walz- und Glühbehandlung das Blech von einem nichtkornorientierten Werkstoff zu einem kornorientierten Werkstoff umgewandelt. Durch diese eingebrachte Anisotropie<sup>6</sup> im Werkstoff verringern sich bei entsprechender Magnetisierungsrichtung die Ummagnetisierungsverluste und die Permeabilitätszahl<sup>7</sup> steigt. (5)

---

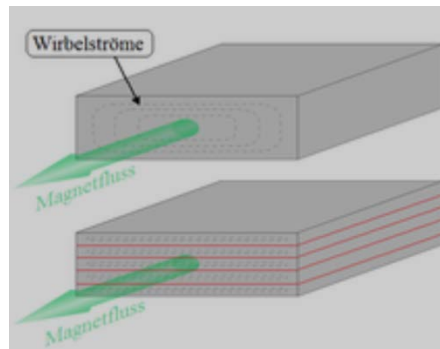
<sup>3</sup> Sättigung des Kerns tritt bei zu hoher magnetischer Flussdichte ein. Ist der Kern gesättigt, verliert der Werkstoff seine hohe magnetische Leitfähigkeit und diese reduziert sich im Extremfall auf Null.

<sup>4</sup> Auch Elektroblech genannt, ist ein weichmagnetischer Werkstoff

<sup>5</sup> ist eine abgeleitete SI-Einheit für die magnetische Flussdichte

<sup>6</sup> Bezeichnet die Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft (z.B. Anordnung der Teilchen und Magnetisierungsrichtung)

<sup>7</sup> Bestimmt die magnetische Durchlässigkeit einer Materie für magnetische Felder (Formelzeichen  $\mu$ ) (7)



**Abbildung 1: Wirbelstromverluste Unterschied zwischen Eisenkern und geschichteten kornorientierten Blechen (6)**

Kornorientierte Dynamobleche werden zu dünnen Blechen gewalzt, ausgestanzt und in Walzrichtung parallel zur magnetischen Flussrichtung geschichtet, um Wirbelstromverluste zu reduzieren. Die Blechschichten werden zueinander isoliert, um die Durchflutung annähernd gleich auf die einzelnen Blechpakete aufzuteilen. Diese Isolation wird versucht dünn zu halten, um einen möglichst großen Eisenfüllfaktor auf einen möglichst kleinen Kernquerschnitt zu erhalten. Wenn die Isolierschicht beschädigt ist, kommt es bei großen Transformatoren zu einer erheblichen lokalen Erwärmung des Blechpakets, zu sogenannten Wirbelstromverlusten. (7) (8)

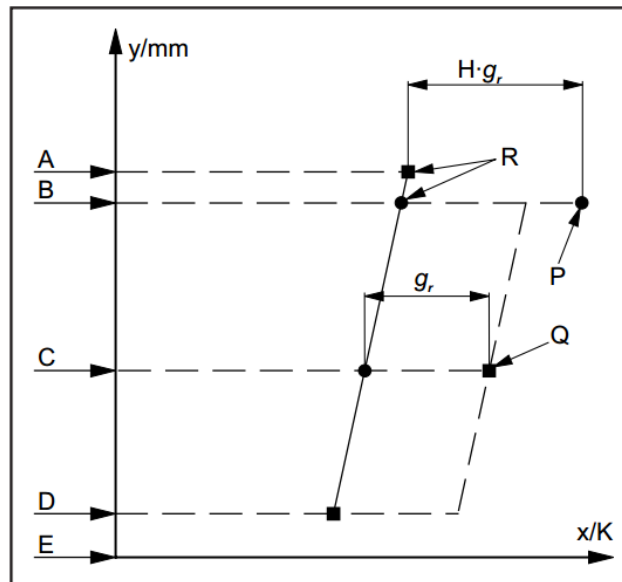


**Abbildung 2: geblechter Transformatorkern aus Dynamoblech (während Fertigung) (9)**

Der thermisch am höchsten belasteten Punkt im Inneren des Transformators ist der Heißtemperaturpunkt (engl. Hotspot). An diesem Punkt ist die höchste Temperatur im Inneren der Transformatorwicklung zu erwarten. An der Wicklungsoberfläche kann das Isolieröl die Wärme gut aufnehmen und an die Radiatoren ableiten. Im Inneren der Wicklung ist hingegen vergleichsweise wenig Öl zur Ableitung der Wärme vorhanden und es kommt

zudem aufgrund der geometrischen Verhältnisse zu Wärmestrahlungen von einem Leitungsbündel auf das andere.

Die Temperaturen im Inneren des Transformatorkerns verhalten sich wie in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3: Temperaturmodell eines Transformators nach 1 EC 60354 (8)**

- A Temperatur der obersten Ölschicht
- B Temperatur im Transformatortank am oberen Ende der Wicklung
- C Temperatur der Ölfüllung des Tanks in der Mitte der Wicklung
- D Temperatur am unteren Ende der Wicklung
- E repräsentiert den Boden des Tanks
- P Heißpunkt- oder Hot-Spot-Temperatur
- Q durchschnittliche Wicklungstemperatur
- R Punkte, von denen man annimmt, sie hätten die gleiche Temperatur

Die Ordinate (y-Achse) ist in mm angegeben und zeigt die Lage eines Messpunkts an einer Wicklung; die Abszisse (x-Achse) ist in K dargestellt, da es sich überwiegend um Temperaturdifferenzen zwischen Wicklungsaußenseite und dem Inneren der Wicklung handelt. In der vereinfachten Darstellung wird gezeigt, dass die Öltemperatur vom Boden des Transformators zum Deckel hin steigt (linke Gerade). Prinzipiell dasselbe Verhalten gilt für die Temperatur im Inneren der Wicklung, die aber um die Sprungtemperatur  $g_r$  in Richtung höherer Temperaturen verschoben ist (rechte Gerade). Der Wert dieser Temperaturdifferenz ist eine Transformatorkonstante, die der technischen Spezifikation des Transformators entnommen oder auch beim Hersteller erfragt werden kann. (8)



## 2.3 Wicklung

Auf dem aus Weicheisenblechen geschichteten Eisenkern, der noch ohne Joch ist, wird auf drei Schenkel die Wicklung aufgesetzt, welche je nach Anwendungsgebiet des Transformators als Folien-, Lagen- oder Scheibenwicklung ausgeführt werden kann. Für die Wallung wird ausschließlich Kupfer verwendet, das je nach Anwendungsgebiet mit Isolierlack oder Zellulose ummantelt wird, da Kupfer, neben finanziellen Aspekten auch die beste elektrische Leitfähigkeit hat.



**Abbildung 4: 3-Schenkelkern-Transformator mit Schnitt durch die Wicklung (9)**

In Abbildung 4 ist ein 3-Schenkelkern-Transformator abgebildet. Bei der vorliegenden Abbildung 4 ist dieser blau lackiert und aus geschichtetem Elektroblech aufgebaut. Direkt um den Kern befindet sich die Unterspannungswicklung, welche in diesem Fall als Folienwicklung ausgeführt ist. Darüber liegt die Oberspannungswicklung, hier als Scheibenwicklung ausgeführt.

### 2.3.1 Lagenwicklung

Bei der Lagenwicklung wird zuerst die unterste Drahtlage aufgebracht und erst darauf die nächste Lage (Abbildung 5). Der Anfang und das Ende der nächsten Lage liegen dicht übereinander, daher treten zwischen diesen Stellen hohe Spannungen auf. Dies hat eine starke Beanspruchung des Isolierstoffes der Lagenisolierung zur Folge. Die Lagenisolation muss daher die doppelte Lagenspannung aushalten. Bei der Herstellung ist darauf zu achten, dass die Vakuumtrocknung- und Imprägnierung der Windungsisolation besonders sorgfältig durchgeführt wird. Sollte sich zwischen den Windungen Feuchtigkeit befinden, kann es leicht zur Restgasbildung kommen, welches aufgrund der kompakten Bauweise der Lagenwicklung nur schwer in das umgebende Öl diffundieren kann. (1) (10)

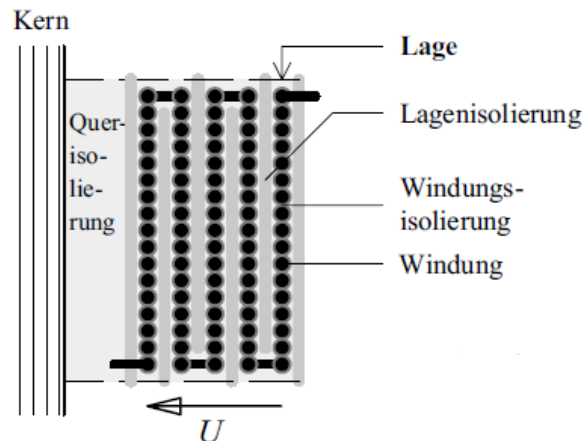


Abbildung 5: Wicklungsschema der Lagenwicklung (1 S. 443)

### 2.3.2 Scheibenspulenwicklung

Die Scheibenspulenwicklung wird bei Hoch- und Höchstspannungswicklungen verwendet. Bei ihr wird die Windungszahl der Wicklung auf einzelne Teilspulen verteilt, die in Reihe geschaltet sind. Dadurch liegt an jeder Spule nur ein Teil der Gesamtspannung an. Dies bewirkt, dass die Spannungen zwischen den Lagen geringer sind und der Transformator für höhere Übertragungsleistungen verwendet werden kann. Ebenso wie bei der Lagenwicklung dient als Windungsisolierung eine getrocknete und ölgetränkte Papierbewicklung des Leiters. Die Spulenisolierung erfolgt über Scheiben und Kantenschutzringe sowie Distanzierungen aus Pressspan. Der Abstand der einzelnen Windungen voneinander ermöglicht eine erleichterte Durchströmung des Transformators mit Isolierflüssigkeit, welche neben der Isolation auch die Verlustwärme der Windungen abtransportieren soll.

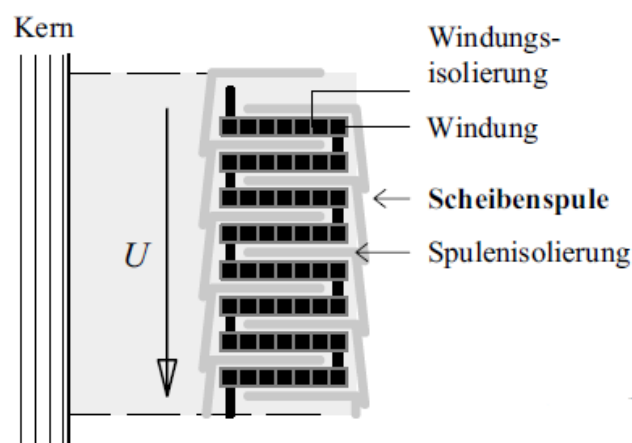


Abbildung 6: Wicklungsschema der Scheibenwicklung (1 S. 443)

### 2.3.3 Folienwicklung

Eine weitere Wicklungsart ist die Folienwicklung, die aus breiten isolierten Aluminium- oder Kupferbahnen besteht, mit welcher die Isolationsschicht mitgewickelt wird. Da aber jede Lage nur aus einer Windung besteht, wird die Isolation mit der Spannung einer Windung beansprucht. Daher ist diese Wicklungsart unter den Verteiltransformatoren nicht sehr geläufig und findet eher im Niederspannungsbereich ihre Verwendung. Vorteilhaft ist, dass sich durch den einfachen Aufbau der breiten Leiterbahnen eine günstige Stromkräfteverteilung im Kurzschlussfall ergibt. Dadurch kommt es zu einer geringeren Kurzschlussstrombelastung. Die Windungsisolierung hat bei dieser Bauweise eher eine Distanzierungsfunktion, die rein dazu dient, Windungsschlüsse<sup>8</sup> zu vermeiden. (1) (4)

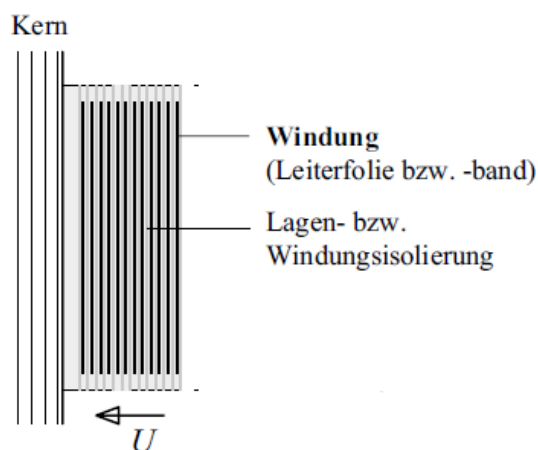


Abbildung 7: Wicklungsschema der Folienwicklung (1 S. 443)

## 2.4 Verlustleistung

Anders als bei idealen Transformatoren treten bei realen Transformatoren Verluste auf, welche in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Es handelt sich um folgende Verluste:

- Wirbelstromverluste bei der Ummagnetisierung im Eisenkern. Diese sind von der Belastung unabhängig und werden in der Literatur als Eisenverluste bezeichnet.
- Wicklungsverluste aufgrund des ohmschen Widerstandes der Kupferwicklung. Diese hängen quadratisch von der Belastung des Transformators ab, das heißt sie sind proportional zum Quadrat der Ströme in den Wicklungen.

<sup>8</sup> Windungsschluss ist eine Zusammenfassung der Wörter Windung und Kurzschluss, meist aufgrund eines Defektes der Isolationsschicht zwischen zweier Windungen.

Die Bestimmung der Verlustleistung erfolgt bei Transformatoren im Leerlaufversuch oder Kurzschlussversuch. Aufgrund dieser ermittelten Daten wird die notwendige Kühlleistung des Transformators bestimmt. Die Verlustleistung stellt neben der elektrischen Isolation sehr hohe thermische Anforderungen an die Isolation des Transformators. Sie muss daher bei größeren Leistungs- oder Verteiltransformatoren über die Isolierflüssigkeit abgeführt werden. Diesbezüglich gibt es mehrere Arten zur Kühlung und Isolation, auf welche in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

## 2.5 Ausführungsformen von Transformatoren

Es gibt unzählige Arten und Anwendungsgebiete von Transformatoren. In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk allerdings auf Hochspannungsleistungstransformatoren mit einer Bemessungsleistung ab 10 MVA, welche für die Energieübertragung und Verteilung in Europa eingesetzt werden. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Einphasen- und Dreiphasentransformatoren.

### 2.5.1 Einphasentransformator/Kleintransformatoren

Kleintransformatoren gibt es in unterschiedlichsten Ausführungen. Sie haben eine Bemessungsleistung bis 16 kVA und Eingangsspannungen von bis zu 1000 V. Sie werden hauptsächlich als Spartransformatoren, Streufeldtransformatoren, Spannungswandler oder Stromwandler eingesetzt. Bei dieser Art von Transformatoren wird meist eine durch Luft gekühlte und mit Isolierlack getränkte Wicklung verbaut. Ölisolierungen kommen bei diesen Transformatoren nicht zur Anwendung. Typische Anwendungsgebiete sind Elektronikartikel oder allgemeine elektrische Verbraucher.



Abbildung 8: Einphasentransformator aus einem Overheadprojektor (11)

## 2.5.2 Drehstromtransformatoren

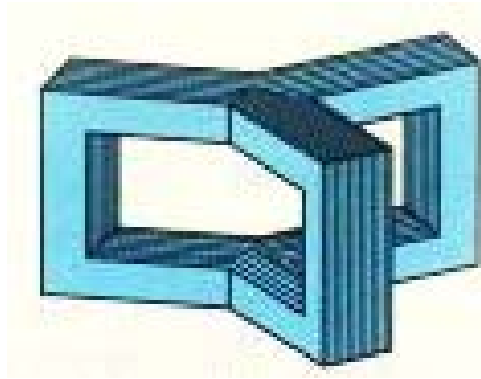
Im Prinzip lässt sich mit drei Einphasen-Transformatoren eine Dreiphasenwechselspannung transformieren. Je nach Wicklungsart werden deren Ein- und Ausgangswicklungen in Dreieck oder durch Sternschaltung miteinander verbunden. Alle Wicklungen sind auf einem gemeinsamen Eisenkörper aufgebracht (wie in Abbildung 9 dargestellt). Diese Ausführungsform von Transformatoren wird im Versorgungsnetz am häufigsten verwendet.

Drehstromtransformatoren haben eine Bemessungsleistung von 10 kVA bis 1000 MVA. Die drei Eisenkerne einer Transformatorengruppe für Drehstrom sind je nach Bauform des Transformators sternförmig oder in einer Reihe aufgebaut. Alle drei Kerne werden von drei magnetischen Flüssen durchflossen und von jeweils zwei Windungen umwickelt.



Abbildung 9: Transformator mit herausgehobenem Aktivteil (12)

Diese drei in Phase liegenden Wechselströme sind um jeweils  $120^\circ$  verschoben. Bei symmetrischer Belastung ist die Summe der magnetischen Flüsse in den mittleren Schenkeln Null und auch der Strom eines Dreiphasenwechselstromnetzes im Neutralleiter Null. Bei Drehstromtransformatoren mit  $120^\circ$  versetzten Wicklungen wird bei Dreischenkelnkernen der mittlere Schenkel in manchen Fällen weggelassen.



**Abbildung 10: Dreischenkelkern 120° versetzt ohne mittleren Schenkel**

## 2.6 Schutzeinrichtungen

Zur Erkennung möglicher Beschädigungen eines Leistungstransformators gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten. Durch den Einbau eines Buchholzschutz-Relais wird eine sofort wirkende mechanische Sicherheitseinrichtung verwendet. Zusätzlich werden in regelmäßigen Intervallen Proben des Transformatoröls entnommen und mittels chemischer und physikalischer Verfahren untersucht. Darüber hinaus können die elektrischen Eigenschaften des Transformators gemessen werden. Bei Leistungstransformatoren setzt sich zusätzlich zur relativ aufwendigen Ölanalyse (Entnahme des Öls vor Ort, Transport, chemische Analyse im Labor), welche nur wenige Einzelzeitpunkte erfassen kann, immer mehr das Transformatormonitoring einschließlich einer Online GC-Analyse durch. All diese Schutzeinrichtungen werden im Kapitel 3.5 beschrieben.

### 2.6.1 Buchholzschutz- Relais

Das Buchholzschutz-Relais dient als Schutzeinrichtung in ölisierten Transformatoren und schützt die Transformatoren bei Windungs- oder Kurzschlüssen.

Liegt im Inneren des Transformators ein Isolationsfehler vor, gibt es eine erhöhte Menge an elektrischen Entladungen. Diese führen zu lokalen Überhitzungen und zersetzen das Isolieröl sowie die Zellulose. Bei dieser Überhitzung entstehen chemische Spaltgase, welche je nach Energiedichte der Fehlerstelle in unterschiedlichem Ausmaß und Zusammensetzung entstehen.

Aufgrund dieser Erkenntnis hat man bereits vor 100 Jahren eine Schutzeinrichtung für Transformatoren entwickelt, das sogenannte Buchholzschutz-Relais (benannt nach Max Buchholz). Im Falle eines Isolationsfehlers kommt es zur Bildung von Gasblasen im Öl, welche aufgrund ihrer geringeren Dichte ans obere Ende des Ölkessels aufsteigen und das sich dort befindende Öl verdrängen. Bei kleinen Fehlern entsteht dadurch ein Druck im oberen Bereich des Öltanks und ein Schwimmer, welcher mit einer Schalteinrichtung



verbunden ist, senkt sich ab. Dadurch wird ein Schalter betätigt und ein oder mehrere Fehler werden gemeldet. (siehe Abbildung 11) Bei großen Fehlern, wie Wicklungs- oder Erdschlüssen beispielsweise, entsteht eine wesentlich größere Gasblase und es tritt ein plötzlicher Überdruck auf, der eine starke Ölströmung hervorruft. Diese Strömung wird mit Hilfe des Stauschiebers detektiert und ein anderer Schaltkontakt meldet die starke Zirkulation des Isolieröls. Es kommt zu einer sofortigen Abschaltung des Transformators.

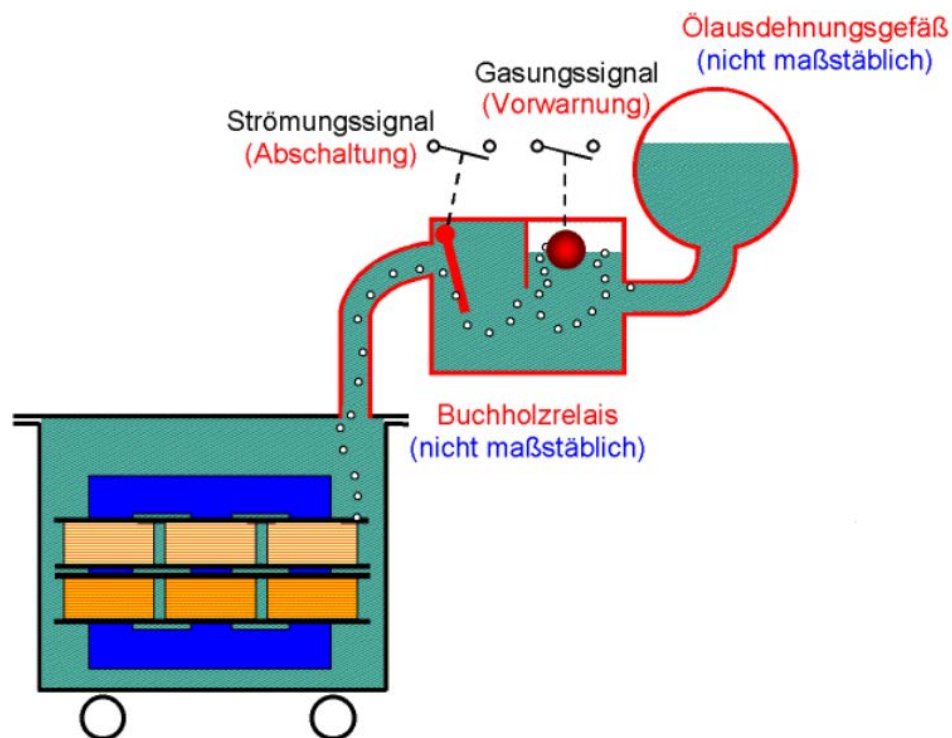


Abbildung 11: schematische Darstellung des Buchholzschutz-Relais (13)

Das Buchholzschutz-Relais befindet sich üblicherweise in der Ölverbindungsleitung zum Ausdehnungsgefäß und somit meist am oberen Deckel des Gehäuses. Zusätzlich wird ans Buchholzschutz-Relais eine Kupferrohrleitung angeschlossen, welche im Betrieb zu einer gefahrlosen Ölprobenentnahme verwendet wird. Diese Ölproben sind eine weitere Schutzmaßnahme beim Betrieb von Leistungstransformatoren und werden im Kapitel Gasanalyse (Punkt 2.6.2) im Labor näher beschrieben. (14)

## 2.6.2 Gasanalyse im Labor

Die laufend entnommenen Ölproben werden analysiert, um Rückschlüsse darauf ziehen zu können, welcher Isolierstoff im Transformator gegast hat und wie der Alterungsgrad der Isolation aussieht. Je mehr Gase im Öl enthalten sind, desto desolater ist der Zustand der Isolation. Dazu wird das Öl in drei getrennten Verfahren analysiert. Neben einer che-

mischen Untersuchung der flüssigen Bestandteile des Öls (CHEM) erfolgt eine Untersuchung der im Öl gelösten Gase (DGA). Zusätzlich dazu werden die durch eine Zersetzung des Öls möglicherweise entstandenen Furane gezielt untersucht (FUR).



**Abbildung 12: Färbung der Öle (15)**

Am Öl selbst sind unter anderem die Farbe, hierbei gibt es zur Klassifizierung einen Farbindex von „0“ (farblos, neu) bis „6“ (dunkelbraun), sowie die Durchschlagsspannung, der Wassergehalt als auch die Wassersättigung zwischen trocken (mit < 6 ppm Wasser im Mineralöl) bis zu extrem feucht (mit > 30 ppm Wasser im Mineralöl) und die Neutralisationszahl bzw. der Säuregehalt interessant. Der Säuregehalt gibt Aufschluss über die Alterung der einzelnen Transformatorteile. Der Zerfall der Zellulose aus der Lagenisolation der Wicklungen beispielsweise lässt den Säuregehalt steigen. Bei den chemischen Untersuchungen wird auch die Reinheit des Öls, die Verseifungszahl, der Verlustfaktor bei 50 Hz, die Dichte bei 20 °C, die Brechungszahl, die Grenzflächenspannung, der Partikel und der Inhibitor<sup>9</sup>-Gehalt festgestellt.

### **2.6.3 Monitoring-Systeme**

Online-Monitoringsysteme sind bei Leistungstransformatoren von Großkraftwerken in den letzten 10 Jahren schon zum Standard geworden. Ziel dieser Onlineüberwachung der Isolation ist die Gewährleistung einer zuverlässigen Energieversorgung in Verbindung mit

---

<sup>9</sup> Inhibitoren sind Additive die eingesetzt werden um Korrosion an metallischen Oberflächen zu vermeiden.



einem reduzierten Instandhaltungsaufwand und einer optimalen Ausnutzung der Anlage. Durch kontinuierliche Überwachung des Isolieröls können frühzeitig Unregelmäßigkeiten erkannt und Ausfälle vermieden werden. Dadurch kann anhand der Lebensgeschichte und des momentanen Zustandes des Transformators eine hohe und kontrollierte Aussage der Restnutzungsdauer erreicht werden. Im Bedarfsfall geben diese stetigen Analysen schon vorzeitig Hinweise über Servicemaßnahmen oder Maßnahmen, welche die Nutzungsdauer des Transformators verlängern (im Sinne von Life-Management).

Ein weiterer Vorteil von Online-Monitoringsystemen ist, dass eine konsequente Ausnutzung der technisch möglichen Beanspruchung des Transformators ermöglicht wird. Durch die thermische Modellierung können mit Hilfe von Computerprogrammen Angaben zur momentanen Überlastbarkeit des Transformators errechnet werden und so besser auf Lastspitzen im Stromverteilungsnetz eingegangen werden.

## 2.6.4 Online GC-Analysen

Als Gaschromatographie bezeichnet man eine chromatographische Technik zur Trennung von gasförmigen Stoffgemischen oder Gemischen, die vollständig in die einzelnen Bestandteile verdampft werden können. (16)

Bei der Online Gaschromatographie werden die entstehenden Spaltgase, welche sich am höchsten Punkt des Transformators sammeln, nicht im klassischen Labor einer Gasanalyse unterzogen, sondern das System wird vor Ort am Transformator installiert und misst kontinuierlich die Gase im Isolieröl. Ein Ansteigen der gelösten Gaskonzentration wird als Warnung weitergegeben. Die Extraktion der Gase aus dem Öl erfolgt teilweise mittels einer semipermeablen Membran<sup>10</sup>, die einen Gasraum vom Öl des Transformators abtrennt, durch das Headspace-Prinzip<sup>11</sup> oder durch eine Vakuum-Entgasung. Damit wird mithilfe von Halbleitersensoren, Brennstoffzellensensoren, Photo-akustischen Messverfahren oder Gaschromatografie eine kontinuierliche Vollanalyse aller Gase, die während des Betriebes entstehen, gemacht. Der Gaschromatograph führt eine qualitative und quantitative Analyse der extrahierten Gasmischung durch und analysiert dabei 11 verschiedene Gase: H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>. Die gemessenen Konzentrationen werden in µl/l oder ppm (v/v) (parts per million, volumetrisch) angegeben. Für die Interpretation der Gaswerte sind verschiedene Interpretationsverfahren bekannt: beispielsweise das grafische Duval-Dreieck oder die Interpretationsverfahren nach Dörnenburg oder Müller Schliesing Soldner, welche mit Fehlergas-Quotienten arbei-

---

<sup>10</sup> semipermeablen Membran ist eine Membran bei der das Lösungsmittel, aber nicht den gelösten Stoff durchgelassen wird. Es werden nur Moleküle unterhalb einer bestimmten Molmasse bzw. Kolloide oder Partikel unterhalb einer bestimmten Größe durchgelassen. (80)

<sup>11</sup> Möglichkeit, um flüchtige Bestandteile von der nicht oder nur schwer flüchtigen Matrix abzutrennen (81)

ten. Auf diese Gasinterpretationsverfahren wird im Zuge dieser Diplomarbeit jedoch nicht weiter eingegangen. (17) (18)

Da elektrische Entladungen zur Abspaltung von Wasserstoff führen und es bei hoher Energiedichte in Lichtbögen und Funkenbildung auch zu ungesättigten niedermolekularen Kohlenwasserstoffen kommt, werden bei der GC-Analyse speziell diese Gase beobachtet. Durch die thermische Überhitzung an den Hot-Spots im Transformator kommt es zum chemischen Vorgang der Pyrolyse, bei dem die Mineralölmoleküle zersetzt werden. Dadurch entstehen große Mengen an langkettigen Kohlenwasserstoffen mit zwei oder drei Kohlenwasserstoffatomen. Kommt bei der Gasanalyse Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid zum Vorschein, so gibt dies Rückschlüsse auf eine Zersetzung der Zellulose, von welcher die Sauerstoffatome stammen. (18) (19)

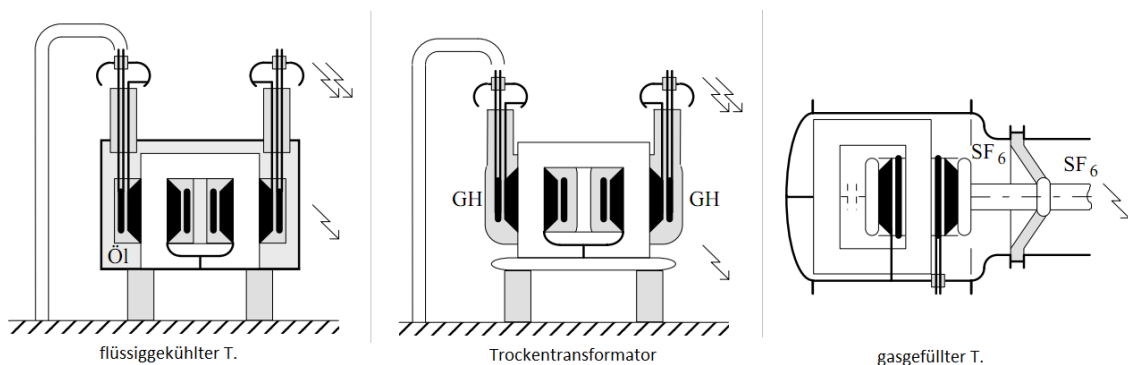
Die Bewertung der Gasanalyse ist nach wie vor ein Interpretationsverfahren und braucht sehr viel Erfahrung und umfangreiche Kenntnisse der Zusammenhänge und der konstruktiven Besonderheiten des zu beurteilenden Transformators. Denn selbst fehlerfrei arbeitende Transformatoren entwickeln Gase. (20)

### 3 Isolationssysteme für Transformatoren

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Isolationssysteme für Wechselspannungstransformatoren vorgestellt und erörtert.

Das Isolationssystem ist nicht nur für die elektrische Isolation und Wärmeleitung verantwortlich, sondern spielt auch eine zentrale Rolle bei der Aufnahme von mechanischen Kräften. Anzumerken ist, dass es je nach Anwendung eine Vielzahl an verschiedenen Transformatorbauformen gibt, die in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt werden. Es wird ausschließlich auf die gängigsten Isolationssysteme eingegangen, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Hochspannungsanwendungsbereich liegt, insbesondere auf der Öl-Papier-Isolation, welche am häufigsten verwendet wird.

In Abbildung 13 sind die unterschiedlichen Isolationsarten sehr vereinfacht dargestellt. Unmittelbar zu erkennen ist, dass diverse Konstruktionsmaßnahmen je nach Isolationsart entfallen können.



**Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau der verschiedenen Transformatortypen, hier zu sehen ein Einphasentransformator (1 S. 353)**

#### 3.1 Transformatoren mit Öl-Board-Isolation

Bei einem Transformator mit Öl-Board-Isolation handelt es sich um einen Transformator, dessen Wicklung sich in einem mit Isolieröl gefüllten Öltank befindet. Diese Isolationsart ist bis heute Stand der Technik bei Leistungstransformatoren in der Hochspannungstechnik. Grundsätzlich bestehen Öl-Board-Transformatoren aus festen und flüssigen Isolierstoffen. Während des Herstellungsprozesses werden dabei Zellulosefasern des Trans-

formators mit dem Transformatoröl imprägniert. In der Geschichte wurden anfangs als feste Isolierstoffe vor allem Asbest oder Kartonisolierungen in Verbindung mit Luftkühlung verwendet. Darauf folgten später Schellackisolierungen, diese waren ein großer Erfolg, obwohl die gesundheitlichen Folgen von Asbest zu dieser Zeit noch nicht bekannt waren. Als 2005 das EU-weite Verbot von Asbest eingeführt wurde, gewann die Öl-Board-Isolation mehr und mehr an Bedeutung. Abbildung 14 zeigt die öldurchströmten Kanäle aus Zellulosmaterial im Inneren eines Öl-Board-isolierten Transformators. Bei dieser Bauweise handelt es sich um eine Mischisolierung aus Zellulose und Isolieröl. Die dielektrische Festigkeit ist wesentlich höher, als wenn ausschließlich Isolieröl verwendet werden würde.



**Abbildung 14: Aufbau der Isolierung eines Leistungstransformators (21)**

Ein weiterer Vorteil sind die besseren Kühleigenschaften der Öl-Transformatoren zu nennen. In einer Zeit, in der der Leistungsbedarf von Jahr zu Jahr steigt und somit auch die Wärmeverluste ansteigen, sind ausgezeichnete Kühleigenschaften unabkömmlich. Durch die Isolierung aus einer Kombination von Isolieröl mit Zellulose wird eine gute Wärmeabfuhr durch Konvektion<sup>12</sup>, aber auch eine hohe Wärmekapazität<sup>13</sup> bei kurzzeitigem Überlastbetrieb ermöglicht. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass in der Produktionsphase die

<sup>12</sup>(von lat. Convehere = mittragen, mitnehmen) ist, neben Wärmeleitung und Wärmestrahlung, ein Mechanismus zum Transport von thermischer Energie. Konvektion ist dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmeübertragung durch den Transport von Teilchen bewerkstelligt wird, die thermische Energie mitführen. (76)

<sup>13</sup> Spezifische Wärmekapazität. Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes gibt an, wie viel Wärme von einem Kilogramm (1 kg) dieses Stoffes abgegeben oder aufgenommen wird, wenn sich seine Temperatur um ein Kelvin (1 K) ändert (76)

Isolation vollständig trocknen, entgasen und vor allem hervorragend mit Öl imprägnieren kann. (22) (1) (23) (24)

Eine noch nicht zur Gänze erforschte Art der ölimprägnierten Papier-Transformatoren sind Hochtemperatur-Trockentransformatoren. Da das herkömmliche Zellulosematerial thermisch Grenzen aufweist, gibt es Forschungen hin zu einem zellulosefreien Material (Aramide), welches unter dem Namen Nomex®- Board bekannt ist. Vorteilhaft daran ist, dass die Dauertemperaturbeständigkeit bei über 220°C liegt, es eine erhöhte Formstabilität aufweist und eine bessere Teilentladungsfestigkeit hat. Der hohe Preis dieses Isolierstoffs rechtfertigt aus heutiger Sicht jedoch noch nicht die Anwendung für Standardtransformatoren. (10) (25)

## 3.2 Trockentransformatoren

Trockentransformatoren werden vor allem bei Innenraumanwendungen eingesetzt, da von diesen eine geringere Gefahr bezüglich der verwendeten Isolierstoffe ausgeht. Sie werden in unterschiedlichen Varianten gebaut, entweder mit reiner Feststoffisolierung (Gießharz) oder mit Gasisolierung ( $\text{SF}_6$ )<sup>14</sup>. Diese Art der Transformatoren wird in dieser Arbeit aber nicht näher erläutert.

### 3.2.1 Gießharztransformatoren

Hauptanwendungsgebiet für Gießharztransformatoren ist die Mittelspannungsebene, wo diese meist als Spannungswandler eingesetzt werden. Da sich zwischen den einzelnen Wicklungslagen Lufteinschlüsse befinden, können sie nur begrenzte Feldstärken isolieren und sind daher leistungsbegrenzt. Des Weiteren kommt es durch die Gießharzummantelung der Spulenkörper zu einer wesentlich schlechteren Wärmeabfuhr als bei flüssigkeitsgefüllten Transformatoren. Die einzige Möglichkeit zur Wärmeabfuhr ist die Belüftung mittels Luftkühlkanälen zwischen Kern und Wicklung oder innerhalb der Wicklung selbst. Größter Vorteil dieser Bauweise ist der ölfreie Aufbau und somit der Entfall der Brandlast sowie damit verbunden die geringeren Gefahren für die Umwelt und der Entfall des Kesselbaues. (1) (26)

---

<sup>14</sup> Schwefelhexafluorid wird als Isoliergas in Mittel- und Hochspannungstechnik angewendet die Durchschlagfestigkeit ist dreimal so hoch wie bei Luft



**Abbildung 15: Gießharztrockentransformator (1250 kVA; 10/0,4 kV) (27)**

### 3.2.2 Gasisolierte Transformatoren

Gasisolierte Transformatoren sind ebenfalls Trockentransformatoren, d.h. frei von jeglichen Ölen. Sie werden in einem Druckgaskessel meist unter  $\text{SF}_6$  mit Folienisolierung gebaut. Das Hauptanwendungsgebiet findet sich in Spannungswandlern oder Prüftransformatoren. Größter Vorteil ist die Anwendung in gasisolierten Schaltanlagen, in denen sich ohnehin eine  $\text{SF}_6$  Atmosphäre befindet. Die Anwendung in Leistungstransformatoren ist zwar technisch möglich, jedoch ist der wirtschaftliche Aufwand nicht mit dem eines ölgefüllten Transformators zu vergleichen.

### 3.2.3 Kabeltransformatoren

Eine etwas weniger verbreitete Möglichkeit zur Herstellung einer trockenen Hochspannungstransformatorwicklung ist die aus aufgewickelten und von außen gekühlten VPE-Kabeln<sup>15</sup>. Vorteil dieser Transformatoren ist, dass sie praktisch keine Wartung benötigen und speziell für Grundwasserschutzgebiete, EMV<sup>16</sup>-empfindliche Bereiche, aber auch

---

<sup>15</sup> Vernetzte Polyethylen-Kabel

<sup>16</sup> Elektromagnetische Verträglichkeit (**EMV**) bezeichnet die Fähigkeit eines technischen Geräts, andere Geräte nicht durch ungewollte elektrische oder elektromagnetische Effekte zu stören, oder durch andere Geräte gestört zu werden. (28)

feuchten, um nicht zu sagen in tropischen Gebieten, einsetzbar sind. Die Betriebstemperatur dieser Aggregate ist jedoch auf 90°C begrenzt. (1) (28)

### **3.2.4 Supraleitende Transformatoren**

Mit der Vision von wesentlich verlustärmeren supraleitenden Transformatoren sind auch neue Vorstellungen über den Aufbau des Isolationssystems auf der Basis von flüssigem Stickstoff verbunden. (1)

### **3.2.5 Drosseln**

Hochspannungsfeste Drosseln sind ähnlich wie Hochspannungstransformatoren aufgebaut. Sie werden deshalb nicht gesondert beschrieben. An die Stelle des geschlossenen Eisenkerns tritt ein Eisenkern mit einfachem oder verteiltem Spalt, der die Induktivität bestimmt. Die Wicklung entspricht einer Transformator-Hochspannungswicklung. Als Isolationssystem kommen alle Transformator-Isolationen in Betracht. Beispiele sind öl-papierisolierte Drosseln in Kesselbauweise für große Leistungen oder leichtere SF6 – druckgasisolierte Drosseln für den mobilen Einsatz. Anwendungen von Drosseln sind Filterkreise, z.B. in HGÜ-Anlagen oder Serienresonanzdrosseln in der Vor-Ort-Prüftechnik. (1)





## 4 Isolierflüssigkeiten

Im nachfolgenden Kapitel wird speziell auf Mineralöl und den biologisch abbaubaren Ester als Isolierstoff eingegangen. Im Vorfeld ist anzumerken, dass insbesondere Mineralöl seine Fähigkeiten als elektrische Isolierflüssigkeit seit mehr als 100 Jahren unter Beweis gestellt hat und daher in Kombination mit Zellulose nach wie vor das gängigste Isoliermaterial in Hochspannungstransformatoren ist. Für biologische Isolierflüssigkeiten ist es daher umso schwieriger, sich auf dem Markt zu etablieren. Aufgrund von ökologischen Anforderungen besteht jedoch immer mehr das Verlangen hin zu umweltverträglicheren, biologisch abbaubaren Isolierstoffen. Vermehrt kommen biologische Transformatoröle wie zum Beispiel die natürliche Esterflüssigkeit Envirotemp® FR3™ zum Einsatz. Im folgenden Kapitel wird neben den Aufgaben der Isolierflüssigkeit auch auf die wesentlichsten Parameter eingegangen.

### 4.1 Funktion der Isolierflüssigkeit

In flüssigkeitsgefüllten Transformatoren wird eine dielektrische Isolierflüssigkeit verwendet, um die Wicklungen zu kühlen, die einzelnen Wicklungspakete voneinander zu isolieren und damit eine optimale Übertragungsleistung auf möglichst engem Raum zu erzielen. Prinzipiell unterscheidet man zwischen natürlicher Kühlung in Form von Konvektion und einer erzwungenen Kühlung mit Hilfe von Ölumwälzpumpen. Bei der natürlichen Konvektion wird die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen durch den Dichteunterschied hervorgerufen. Wärmere Flüssigkeitsteilchen haben eine geringere Dichte und steigen auf, während kühlere Flüssigkeitsteilchen nachströmen. Das kühle Öl strömt somit im unteren Bereich des Transformators ein und fließt durch die Erwärmung vertikal durch die Wicklungskanäle nach oben, wo es wieder aus dem Öltank austritt (siehe Abbildung 16).

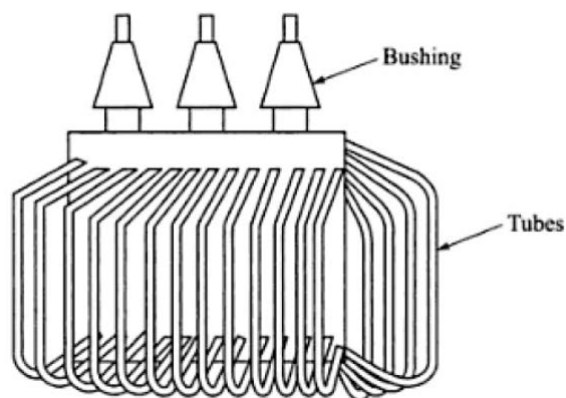
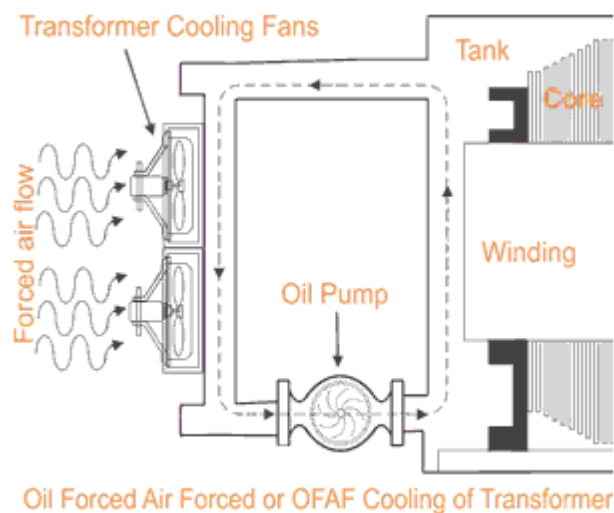


Abbildung 16: automatische Kühlung durch natürliche Konvektion (entnommen aus (29 S. 11))

Die Kühlung mittels natürlicher Konvektion wird meist durch eine Reihe von Ventilatoren unterstützt, welche die Umgebungsluft gegen die Kühlrippen leitet. Dadurch wird eine Verbesserung der außenliegenden Ölkühler erreicht und die Kühlleistung erhöht.

Die Fließgeschwindigkeit ist bei natürlicher Konvektion abhängig vom Temperaturgradienten im Inneren des Transformators. Bei größeren Transformatoren benötigt man einen pumpenbetriebenen Zwangsumlauf, da ansonsten die Verlustwärme des Transformators in diesem Ausmaß nicht abgeführt werden kann; man spricht von Zwangskühlung. Bei Zwangsumlaufkühlung wird die Energie vom Transportmedium aufgenommen (gespeichert) und nach außen zu den Kühlern geleitet, wo die Energie je nach Auslegung an Luft oder Kühlwasser abgegeben wird und erst dann wird die abgekühlte Flüssigkeit wieder in den Kessel zurückgeführt. (siehe Abbildung 17)

Dadurch ergibt sich im Allgemeinen eine niedrigere Öltemperatur und gleichmäßigere Temperaturverteilung innerhalb des Transformators beziehungsweise im Inneren der Wicklung. Weitere Details zur Wärmeverteilung und zum Wärmetransport werden im Kapitel 4.3.2 und 4.3.3 erklärt.



**Abbildung 17: erzwungene Ölumwälzkühlung (entnommen aus (29 S. 5))**

## 4.2 Elektrische Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten

In den folgenden Kapiteln wird auf die elektrischen Größen des Transformators eingegangen, welche bei der Isolationsauswahl eine wesentliche Rolle spielen. Folgende Faktoren sind bei der Auslegung von großer Relevanz: die elektrische Leitfähigkeit, die Dielektrizitätszahl, die elektrische Durchschlagfestigkeit und der dielektrische Verlustfaktor.

### 4.2.1 Elektrische Leitfähigkeit/ spezifischer Widerstand

Die elektrische Leitfähigkeit von Materialien ist im Allgemeinen von der Anzahl der frei beweglichen Ladungsträger abhängig. In der Elektrotechnik wird die Leitfähigkeit über den Kehrwert des spezifischen Widerstandes beschrieben. Dieser gibt an, wie viele Meter eines Leiters mit dem Querschnitt von  $1 \text{ mm}^2$  bei  $20^\circ\text{C}$  einen Widerstand von 1 Ohm besitzen. Die elektrische Leitfähigkeit wird in Siemens pro Meter angegeben. (30)

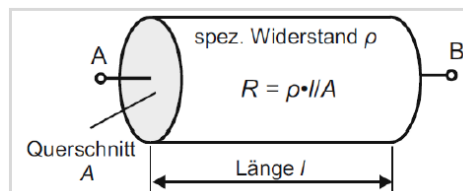


Abbildung 18: Leiter zur Veranschaulichung der Gleichung für die elektrische Leitfähigkeit (31)

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R \cdot A}$$

$A$  ... Querschnitt des Leiters [ $\text{m}^2$ ]

$\kappa$  ... elektrische Leitfähigkeit [ $\frac{\text{S}}{\text{m}}$ ]

$R$  ... elektrischer Widerstand [ $\Omega$ ]

$\rho$  ... spezifischer Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ]

$l$  ... Länge des Leiters [ $\text{m}$ ]

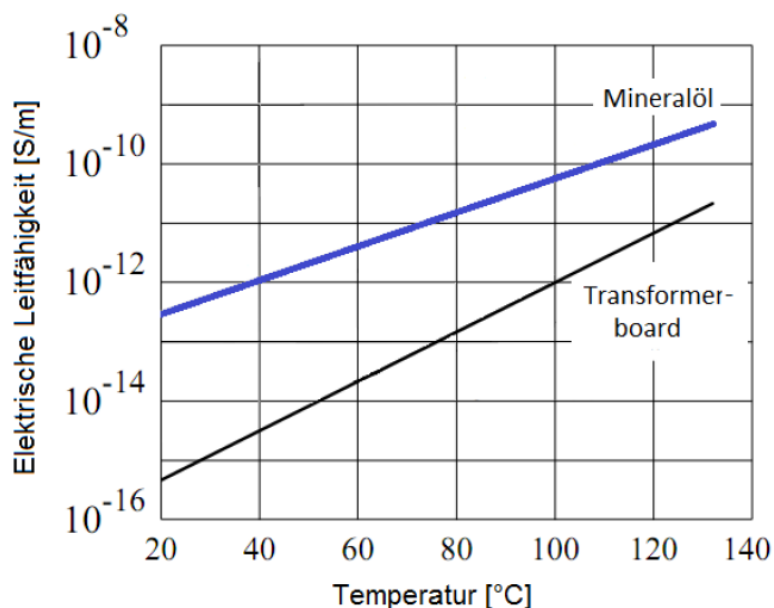
Formel 5

Aufgrund des spezifischen Widerstandes eines Mediums kann man Werkstoffe in 3 Werkstoffgruppen unterteilen. Diese sind der Vollständigkeit halber angeführt, werden jedoch mit Ausnahme der Isolatoren nicht näher erläutert. Detaillierte Informationen bezüglich den spezifischen Widerstands sowie der elektrischen Leitfähigkeit und des atomaren Aufbaus der unterschiedlichen Materialien können unter (32) ab Seite 809 nachgelesen werden.

- Leiterwerkstoffe ( $\rho < 10^{-5} \Omega\text{m}$ )
- Halbleiterwerkstoffe ( $\rho < 10^{-5} \Omega\text{m}$ ) < ( $\rho < 10^{-5} \Omega\text{m}$ )
- Isolatoren ( $\rho > 10^7 \Omega\text{m}$ )

Man unterscheidet bei der elektrischen Leitfähigkeit von Isolatoren zwei Leitungsprozesse. Zum einen gibt es die Ionenleitung und zum anderen die Elektronenleitung. Eine detaillierte Erklärung dieser Leitungsprozesse findet sich ab Seite 355 in (33). Grundsätzlich gilt, dass die elektrische Leitfähigkeit in flüssigen oder festen Stoffen ungefähr bis zur elektrischen Festigkeitsgrenze von der Ionenleitung beeinflusst wird. Erst bei hohen Feldstärken wirkt in beiden Fällen auch die Elektronenleitung. Bei der Ionenleitung kommt es durch die sogenannte Dissoziation; d.h. die Zerlegung einer chemischen Verbindung (z.B. von Verunreinigungen), zu einer Bildung von positiven und negativen Ionen. Der Grund, warum die Elektronenleitung erst bei höheren Feldstärken wirkt, ist, dass sich die freien Elektronen nicht mehr mit positiven Ionen rekombinieren bzw. sich an Moleküle binden können. (1 S. 267ff)

Der Verschmutzungsgrad von Medien ist also neben der Feldstärke, Temperatur, Feuchtigkeit und Reinheit für die Materialzusammensetzung und somit für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich. Der Zusammenhang von Temperatur und Materialabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit bei konstanter elektrischer Feldstärke ist in Abbildung 19 veranschaulicht.



**Abbildung 19: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit bei einer Feldstärke von kV/mm (34)**

In der Abbildung 19 ist eindeutig erkennbar, dass die Leitfähigkeit der Isolierstoffe mit der Temperatur ansteigt. Grund dafür ist, dass die Anzahl der auf dem Leitungsniveau gehobenen Elektronen steigt und durch diese exponentielle Erhöhung der Ladungsträger die Beweglichkeit der Ionen steigt.

### 4.2.2 Dielektrizitätszahl

Die Dielektrizitätszahl, welche in der Literatur auch als Permittivitätszahl bezeichnet wird, stellt das dimensionslose Verhältnis der Durchlassfähigkeit eines Materials für elektrische Felder dar. Die Permittivität von Materialien ist je nach Stoffart unterschiedlich. Je nachdem, ob es sich um elektrisch isolierende, polare oder unpolare Stoffe handelt, ändert sich diese elektrische Feldkonstante  $\epsilon_r$ .

Das beste Beispiel zur Veranschaulichung der Wechselwirkung eines elektrischen Feldes mit einem Stoff ist ein Kondensator. In einem mit Material gefüllten Kondensator orientieren sich die Ladungsträger des Isolationsmaterials am Vektor des elektrischen Feldes und erzeugen ein Polarisationsfeld, welches dem äußeren Feld entgegenwirkt und dieses schwächt. Die Feldschwächung lässt sich bei Annahme eines gegebenen elektrischen Erregungsfeldes  $\vec{D}$  (auch elektrische Flussdichte genannt) dadurch beschreiben, dass dem isolierenden Material ein Faktor  $\epsilon_r$  zur elektrischen Feldkonstante  $\epsilon_0$  (Permittivität des Vakuums) zugewiesen wird. Das Vakuum wird als Referenzmaterial eines Isolierstoffes herangezogen und im Vakuum gilt die relative Permittivität von  $\epsilon_r = 1$ .

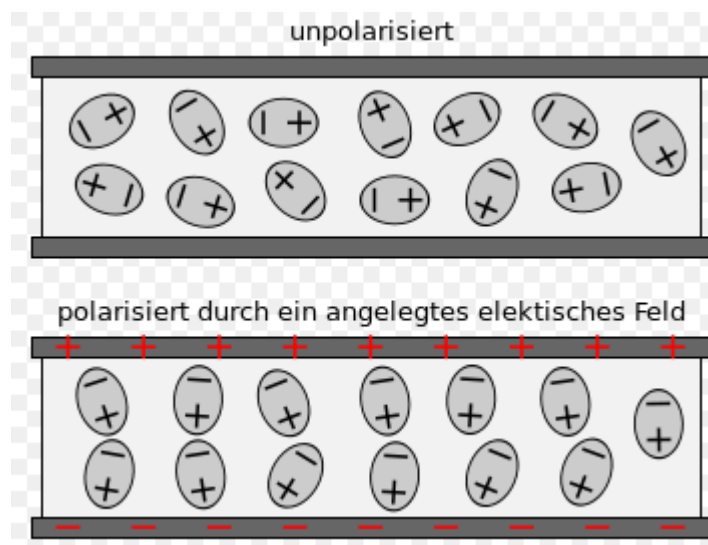


Abbildung 20: Auswirkung des Dielektrikums für unterschiedliche Materialien (35)

Wie in Abbildung 20 ersichtlich ist führt die Orientierung ortsfester, elektrisch geladener Dipole in einem Dielektrikum zu Polarisierungseffekten. Solche Materialien können den elektrischen Fluss um den Faktor  $\epsilon_r$  besser leiten als der leere Raum. (36)

Aus der äußeren elektrischen Erregung ergibt sich dann mit der Permittivität  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  das elektrische Feld  $\vec{E}$  zu

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

**Formel 6**

Wie aus Formel 5 hervorgeht nimmt bei konstanter elektrischer Erregung und steigenden Werten von  $\epsilon_r$  die elektrische Feldstärke ab. Damit erfolgt eine Verschiebung des elektrischen Feldes von der Isolierflüssigkeit ins Papier. Auf diese Weise wird der feldschwächende Effekt bei gleicher elektrischer Erregung erfasst, d.h. bei vorgegebener elektrischer Flussdichte oder vorgegebener elektrischer Ladung.

Betrachtet man die elektrische Permittivität von Isolierflüssigkeiten, so liegt man in einem Bereich des  $\epsilon_r$  von 2,4 bei Mineralöl und 3,4 bei natürlichem Ester. Je höher die Permittivitätskonstante eines Materials ist, desto enger können die Abstände zweier elektrisch aktiver Leiter sein, um dieselbe elektrische Durchlassfestigkeit zu besitzen.

### 4.2.3 Elektrische Durchschlagfestigkeit

Die elektrische Durchschlagfestigkeit stellt eine kritische Feldstärke dar, bei der keine vollständige Potenzialtrennung mehr gewährleistet werden kann. Ein elektrischer Durchschlag kann bereits bei niedrigen, aber auch bei hohen elektrischen Spannungen erfolgen. Der ausschlaggebende Faktor ist die anliegende elektrische Feldstärke, welche durch die Spannungshöhe und den Elektrodenabstand beeinflusst wird. Prinzipiell unterscheidet man in der Elektrotechnik zwischen verschiedenen Durchschlagarten, welche je nach verwendetem Material unterschiedlich entstehen. Da in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf ölgefüllten Transformatoren liegt, wird ausschließlich auf den Durchschlag in flüssigen Isolierstoffen eingegangen.

Die Ladungsträger von flüssigen Isolierstoffen, welche einen Durchschlag verursachen können, sind die positiven und negativen Ionen, die chemisch durch die Aufteilung von Verunreinigung oder durch Alterung der Isolierflüssigkeit entstehen. Die elektrische Durchschlagfestigkeit von Isolierflüssigkeiten hängt von der Art, der Höhe und der Dauer der elektrischen Spannung sowie vom Abstand und der Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden ab. Gründe für die Abnahme der Durchschlagfestigkeit liegen in der relativen Feuchtigkeitsaufnahme und dem Gasgehalt sowie der Verunreinigung des Isolieröls.

Bei flüssigen Isolierstoffen gibt es bisher keine einheitliche Durchschlagstheorie, sondern nur eine Vorstellung des Durchschlags durch die Bildung von Mikrobäschen.

Diese Theorie besagt, dass Isolierflüssigkeiten einen teilkristallinen Aufbau besitzen, wobei die Bindungskräfte zwischen den einzelnen Molekülen den Kräften aus der ständigen Wärmebewegung gegenüberstehen und sich somit durch diese permanente Temperaturbewegung der Moleküle sogenannte Mikrogasbläschen im Inneren des Öls bilden. Diese

Gasbläschen verflüchtigen sich unter normalen Bedingungen. Wenn sich diese allerdings in einem elektrischen Wechselfeld befinden, dann können sie sich nicht Rekombinieren<sup>17</sup>. Diese so entstehenden Mikrobiaschen stellen eine Verunreinigung der Isolierflüssigkeit mit geladenen Teilchen dar und verringern somit die Durchschlagfestigkeit des Isolieröls. Es kommt innerhalb der Mikrobiaschen zur Stoßionisation<sup>18</sup> und in weiterer Folge zur Entstehung eines sogenannten verschleierte Gasdurchschlags. Dieser Gasdurchschlag führt zur Ausbildung eines Lichtbogens, welcher durch seine Abwärme weitere Gasblasen erzeugt, wodurch die leitende Verbindung zwischen zwei Leitern verstärkt wird. (19)

Die elektrische Durchschlagfestigkeit wird in KV/mm angegeben und ist laut IEC 60156 genormt. Sie ist das wichtigste Kriterium für die Auswahl von Isoliermedien. (37)

#### 4.2.4 Dielektrischer Verlustfaktor

Ein idealer Isolierstoff verursacht keine elektrischen Verluste, da sich theoretisch der Winkel zwischen Strom und Spannung bei Wechselspannung mit 50 Hz im Zeigerdiagramm bei 90° befindet. Die elektrischen Verluste eines realen Isoliermediums sind jedoch nicht null, sondern messbar. Sie spiegeln die realen Bauteileigenschaften einer Kapazität beziehungsweise einer Induktivität wieder. Somit stellt der Verlustfaktor durchaus eine sehr bedeutende Messgröße für die Zustandsbewertung von Transformatoren dar. Wird an ein Dielektrikum Wechselspannung angelegt, ergibt sich zwischen Strom und Spannung ein Winkel von 90°, wobei der Strom I der Spannung U gleich wie bei einem kapazitiven Verhalten voraussetzt.

Aufgrund von Polarisations-, Ionisations- und Leitfähigkeitsverlusten ergibt sich jedoch bei realer Anordnung ein Verlustwinkel  $\delta$ , welcher vom Phasenwinkel abgezogen wird. Je nachdem, ob das Dielektrikum als seriell oder paralleles Ersatzschaltbild dargestellt wird, ergibt sich folgende rechnerische Ermittlung des Verlustfaktors. (38) (Darstellung siehe Abbildung 21)

Verlustwinkel:  $\delta = 90^\circ - \varphi$

Verlustfaktor:  $\tan \delta = \frac{I_R}{I_C}$

Wirkleistung:  $P_R = U * I_R$

Blindleistung:  $Q_C = U * I_C$

**Formel 7**

---

<sup>17</sup> Rekombination stellt den Umkehrprozess zur Ionisation dar

<sup>18</sup> Durch Stoßionisation kann es zu einer Kettenreaktion kommen, welche bei Halbleiterbauelementen beispielsweise zur Ausbildung einer leitenden Verbindung führt

Durch Verwendung der Beziehung dieser 3 Formeln und Berücksichtigung der Ersatzschaltbilder in Abbildung 21 können somit folgende Gleichungen hergeleitet werden.

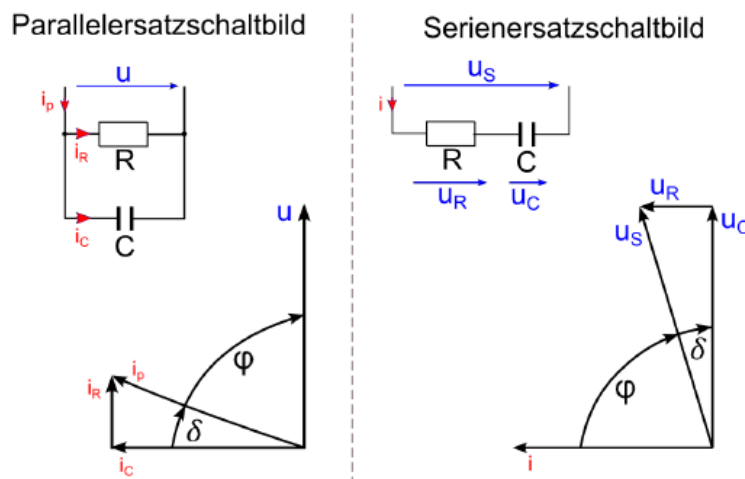
Verlustfaktor:  $\tan\delta = \frac{P_R}{Q_C}$

Verlustfaktor für das Serien-ESB:  $\tan\delta = \frac{I^2 \cdot R}{I^2 / \omega C} = \omega RC$

Verlustfaktor für das Parallel-ESB  $\tan\delta = \frac{U^2 / R}{U^2 / \omega C} = \frac{1}{\omega RC}$

#### Formel 8

Zur Darstellung des Isolationswiderstandes wurde in Abbildung 21 eine Kapazität C und ein Isolationswiderstand R verwendet. (1 S. 272) (39 S. 126)

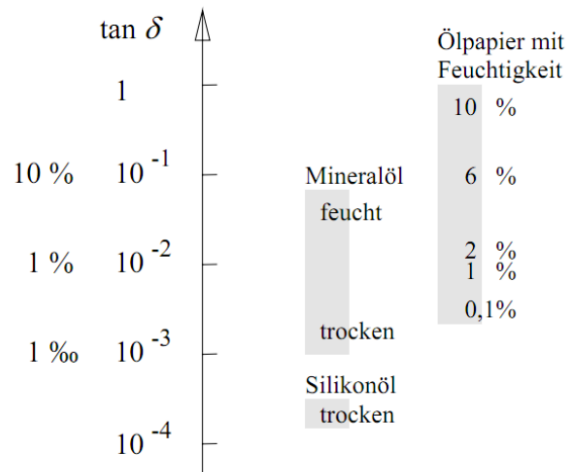


**Abbildung 21: Serien- und Parallelersatzschaltbild für die Ermittlung des Verlustwinkels (40)**

Auf genauere Erklärungen zu den einzelnen Ersatzschaltbildern, als auch auf tiefgreifender mathematische Betrachtungen wird hier nicht weiter eingegangen. Diese können aber in (1) ab Seite 278 oder in (38) nachgelesen werden.

Der Verlustfaktor von Isolierflüssigkeiten oder der Barrieren wird durch die Feuchtigkeit, die Frequenz und die Temperatur am Stärksten beeinflusst. Grund dafür ist, dass je nach Dielektrizitätszahl  $\varepsilon$  unterschiedlich viele, sehr gut polarisierbare Wassermoleküle im Medium vorhanden sind und sich die Leitfähigkeit je nach Feuchtigkeitsgehalt in den Medien unterschiedlich erhöht, siehe dazu Abbildung 22.



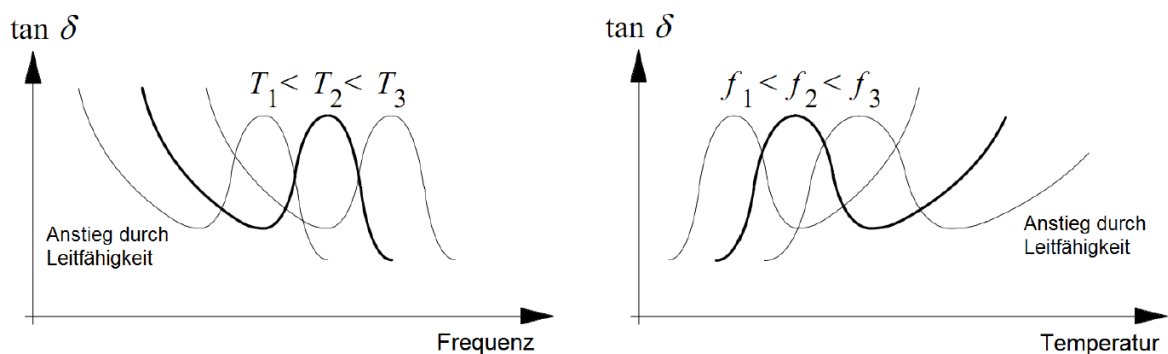


**Abbildung 22: Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit bei 50 Hz und Raumtemperatur (1 S. 251)**

Diese Abhängigkeiten ergeben sich aufgrund der Beweglichkeit der Dipole<sup>19</sup>. So können Dipole bei niedrigen Frequenzen, d.h. bei einem langsam verändernden Feld, wesentlich leichter folgen bzw. wird ihre Beweglichkeit bei hohen Frequenzen stark eingeschränkt. Bei einem Temperaturanstieg im Medium steigt die Beweglichkeit der Dipole ebenfalls an, jedoch nur so lange, bis die Wärmebewegung die Ausrichtung der Pole hindert. Wird dieser Punkt erreicht, entstehen maximale Polarisationsverluste und es kommt zum Absinken des Verlustfaktors. Der bei hohen Temperaturen exponentielle Anstieg des Verlustfaktors bei konstanter Frequenz lässt sich aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit nach der Arrhenius-Beziehung erklären. (25) (1 S. 275,276)

**Formel 9: Arrhenius Beziehung (1)**

$$\kappa = \kappa_0 * e^{\frac{-W}{\kappa T}}$$



**Abbildung 23: Abhängigkeit des Verlustfaktors von Frequenz und Temperatur für ein Dielektrikum mit Orientierungspolarisation**

<sup>19</sup> Dipolmoleküle sind Moleküle, bei denen die Ladungsschwerpunkte der positiven Ladung und der negativen Ladung wegen der unterschiedlichen Elektronegativität der beteiligten Atome nicht zusammenfallen.

In der nachfolgenden Gleichung ist der mathematische Zusammenhang des Verlustfaktors unter Berücksichtigung der Leitfähigkeits- und Polarisationsverluste sowie die mathematische Beschreibung dieser beiden dielektrischen Verluste enthalten.

Verlustfaktor:  $\tan\delta = \tan\delta_L + \tan\delta_{Pol}$

Leitfähigkeitsverluste:  $\tan\delta_L = \frac{\kappa}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}$

Polarisationsverluste  $\tan\delta_{Pol} = \ddot{\varepsilon}_r / \dot{\varepsilon}_r$

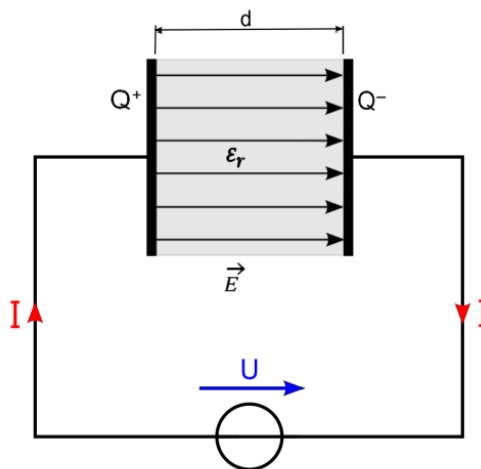
$\ddot{\varepsilon}_r$  ... relative Dielektrizitätszahl (Imaginärteil)[1]

$\dot{\varepsilon}_r$  ... relative Dielektrizitätszahl (Realteil)[1]

$\varepsilon_0$  ... elektrische Feldkonstante  $\left[ \frac{As}{Vm} \right]$

**Formel 10**

Der eingezeichnete Kondensator (Abbildung 24) kann als kapazitives Modell betrachtet werden, welches aus zwei planparallelen Elektroden besteht, zwischen denen sich ein Dielektrikum (Isolierflüssigkeit oder Barrieren aus Pressspan) befindet.



**Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung eines Plattenkondensators (41 S. 120)**

Beim Kondensator beschreibt die Kapazität  $C$  den Zusammenhang zwischen der gespeicherten Ladung  $Q$  und der Ladespannung  $U$ . Die Höhe der Kapazität eines Kondensators hängt prinzipiell von den Materialeigenschaften, dem Plattenabstand und der Größe der sich gegenüberliegenden Flächen ab. Folgende mathematischen Grundlagen führen zur allgemein gültigen Formel für die Kapazität:

Ladung:	$Q = \oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = D \cdot A$
Spannung	$U = \int_d \vec{E} \cdot d\vec{s} = E \cdot d$
Materialbeziehung	$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$
Kapazität (allgemein)	$C = \frac{\oint \vec{D} \cdot d\vec{A}}{\int_d \vec{E} \cdot d\vec{s}}$

$\vec{D}$  ... *dielektrische Verschiebungsdichte*  $\left[ \frac{C}{m^2} \right]$

$\vec{E}$  = *elektrische Feldstärke*  $\left[ \frac{V}{m} \right]$

$A$  ... *Fläche der Elektrode*  $[m^2]$

$\epsilon$  ... *Dielektrizitätszahl*  $\left[ \frac{As}{Vm} \right]$

$d$  ... *Plattenabstand*  $[m]$

#### Formel 11

Fasst man alle vorhergehenden Gleichungen zusammen, dann erhält man die Formel für die Kapazität im Plattenkondensator:

$$C = \frac{\epsilon \cdot E \cdot A}{E \cdot d} = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

$\epsilon_0$  ... *elektrische Feldkonstante*  $\left[ \frac{As}{Vm} \right]$

$\epsilon_r$  ... *Dielektrizitätszahl*  $\left[ \frac{As}{Vm} \right]$

$C$  = **Kapazität**  $[F]$

#### Formel 12

Die Dielektrizitätszahl der Isolierflüssigkeit hat somit direkten Einfluss auf die Kapazitäten im Transformator. Alle anderen Faktoren wie Fläche und Abstand werden beim Retrofill nicht verändert. Da natürlicher Ester eine höhere Dielektrizitätszahl als Mineralölaufweist, könnte der Plattenabstand bei gleicher Belastung sogar verringert werden. Neu gebaute und speziell für Ester designte Transformatoren können somit aus elektrischer Sicht kompakter gebaut werden.

## 4.3 Physikalische Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten

Die physikalischen Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten liegen vor allem in der Unterschiedlichkeit der Viskosität, dem Kaltfließvermögen und den Eigenschaften im Wärmeabtransport. All diese Faktoren sind Bestandteil des nachfolgenden Kapitels und werden dort näher erörtert.

### 4.3.1 Pourpoint

Pourpoint ist jener Punkt, bei dem das Öl gerade noch fließt. Man spricht auch vom Kaltfließvermögen (fließen von Medien bei Temperaturen von unter  $-30^{\circ}\text{C}$ ). Dies ist wichtig für das Startverhalten bei tiefen Temperaturen. Der Pourpoint sollte laut ISO 3016 unter  $-45^{\circ}\text{C}$  liegen. (42)

### 4.3.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes ist die Eigenschaft einer Flüssigkeit oder eines Festkörpers thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren. (43) Diese Fähigkeit ist ein wichtiges Merkmal für die Auswahl von Isolierölen für Leistungstransformatoren.

Durch die elektrischen Verluste im Transformator entsteht je nach Übertragungsleistung Energie in Form von Wärme. Diese Wärme wird durch Konvektion an das Isolieröl übertragen. In diesem Fall erfolgt der Wärmetransport in einem sozusagen ruhenden System, wobei wärmere (energiereiche) Teilchen nahe an der Wicklung in Stoßprozessen Energie an kältere (energieärmere) Teilchen im Bereich der vertikalen Kühlkanäle abgeben. Wie aus der Literatur (44) hervorgeht, gibt es einen differentiellen Ansatz der eindimensionalen Wärmeleitung<sup>20</sup>

$$\dot{Q} = -\lambda * A * \frac{dT}{dx}$$

$$\lambda = f(p, T, \text{Stoff})$$

**Formel 13**

Bei keiner anderen Eigenschaft von Isolierflüssigkeiten liegen die Vorteile von alternativen Isolierflüssigkeiten im Vergleich zu herkömmlichen Mineralöl so klar auf der Hand wie bei den thermischen Eigenschaften. Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der thermischen Eigenschaften von Mineralöl zu natürlichem Ester. Die Literatur weist sehr unterschiedliche Werte für Wärmeleitfähigkeit auf. Es sind Leitfähigkeitswerte für Mineralöl von bis zu  $0,31 \text{ W/(m/K)}$  in der Literatur vorhanden. Diese können aber aufgrund verschiedener Quellen keinen korrekten Wert darstellen und sind somit als Ausreißer zu betrachten. (45)

---

<sup>20</sup> W. Gretler: Vorlesungsskriptum Wärmeübertragung; Institut für Strömungslehre und Gasdynamik; TU Graz

### 4.3.3 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist eine Stoffkonstante, welche angibt, wie viel Wärme von einem Körper mit einer Masse von 1kg aufgenommen oder abgegeben werden kann. Die spezifische Wärmekapazität liegt für Mineralöl bei 25 °C bei 1864 (J/g\*K). Dieser Wert wurde durch Interpolieren des Wertes bei 20 °C und 40 °C ermittelt. Da der Wert bei 25 °C augenscheinlich einen Ausreißer darstellt, wurde dieser nicht mit eingerechnet. Diese Interpolation ist möglich, da sich die thermische Leitfähigkeit linear mit der Temperatur erhöht (46). Die spezifische Wärmekapazität für natürlichen Ester liegt bei 25 °C im Mittel bei 1942 (J/g\*K). Durch natürlichen Ester erreicht man also eine Zunahme der Wärmetransportfähigkeit von ca. mehr als 4 % im Vergleich zu Mineralöl. Damit kann man in erster Näherung sagen, dass der natürliche Ester bei gleicher Temperaturdifferenz mindestens so viel Wärme, wie Mineralöl, abtransportieren kann. Dabei wurde noch nicht berücksichtigt, dass mit dem natürlichen Ester generell eine höhere Wicklungstemperatur gefahren werden kann.

**Tabelle 1: thermische Eigenschaften**

Daten der verglichenen Isolierflüssigkeiten	Mineralöl <sub>(20°C)</sub>	Mineralöl <sub>(25°C)</sub>	Mineralöl <sub>(40°C)</sub>	Natürlicher Ester <sub>(20°C)</sub>	Natürlicher Ester <sub>(25°C)</sub>
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,124 <sup>21</sup> 0,126 <sup>22</sup>	0,12 <sup>25</sup>	0,31 <sup>23</sup>	0,167 <sup>21</sup>	0,167 <sup>24</sup> 0,17 <sup>25</sup>
Spezifische Wärmekapazität [J/kg°C]	1860 <sup>22</sup> 2020 <sup>21</sup>	2100 <sup>25</sup>	1875 <sup>23</sup>	1850 <sup>21</sup>	1884 <sup>24</sup> 2000 <sup>25</sup>

<sup>21</sup> S.Tenbohlen ed.al. Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers Cigre 2008

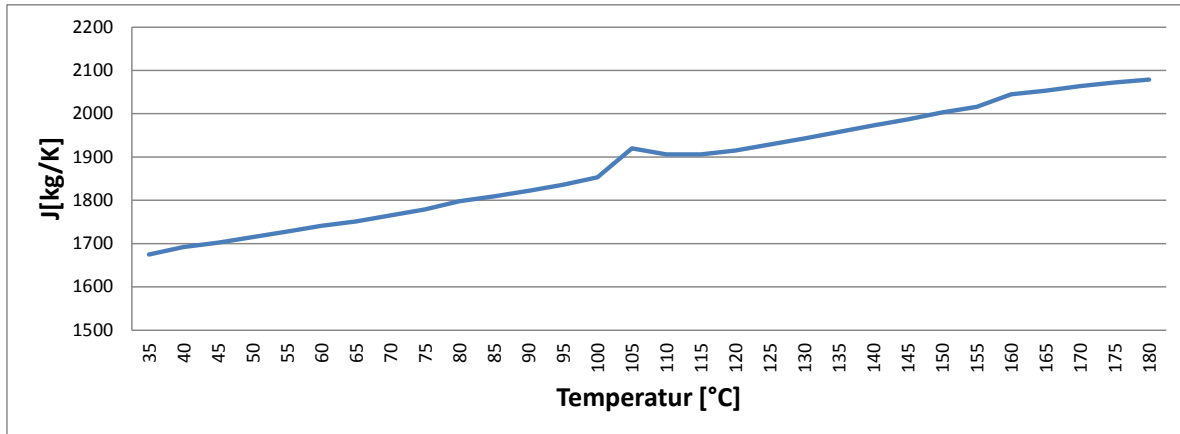
<sup>22</sup> substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mineral\_tranformer\_oil

<sup>23</sup> Hendrik Cosemans, Properties behind effectiveTransformer Oil Cooling 29.9.13

<sup>24</sup> Bulletin 00092 Product Information June 2001

<sup>25</sup> IEC 60076-14:2009

Die spezifische Wärmekapazität ist von der Temperatur abhängig. Abbildung 25 zeigt den Temperatureinfluss auf einen nicht modifizierten Sojabohnenester. Anders als beim Mineralöl nimmt die Wärmekapazität bei steigender Temperatur zu, daher kann der Transformator mit höherer Betriebstemperatur betrieben werden.



**Abbildung 25: Wärmekapazität abhängig von der Temperatur (47)**

### 4.3.4 Viskosität

Die Viskosität ist für die mechanische Auslegung von Transformatoren der wichtigste Parameter. Vor allem bei der Auswahl der Isolierflüssigkeit - je niedriger die Viskosität, desto besser ist es für die Kühlung des Transformators.

#### Grundlagen zum Thema Viskosität:

Viskosität beschreibt die innere Reibung, welche sich beim Fließen einer Flüssigkeit entgegensetzt. (48) Man gehe beispielsweise davon aus, zwei Platten befinden sich parallel zueinander und zwischen ihnen befindet sich eine Flüssigkeit. Bewegt man die obere Platte mit einer konstanten Geschwindigkeit in x-Richtung, während die untere Platte still steht, so ergibt sich unter dieser Annahme, dass:

- a.) die Flüssigkeit an beiden Platten haften bleibt.
- b.) ein linearer Geschwindigkeitsverlauf gegeben ist beziehungsweise der Abstand zur Geschwindigkeit proportional ist.
- c.) und die erforderliche Reibkraft, welche zur Aufrechterhaltung der Bewegung notwendig ist, proportional zum Geschwindigkeitsanstieg in y-Richtung ( $\frac{dv}{dy}$ ) ist.

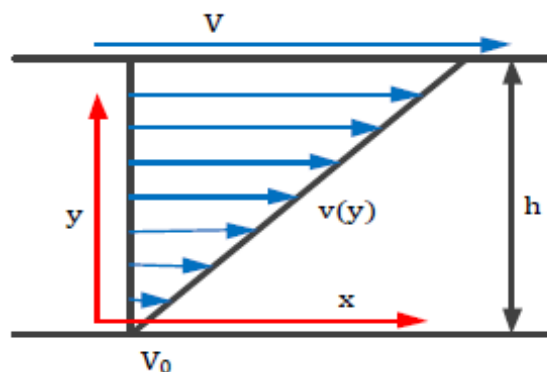


Abbildung 26: Couette-Strömung

das Newtonsche Reibungsgesetz. (43)

$$v(y) = v * \frac{y}{h}$$

$$\tau_{yx} = -\eta * \frac{dv}{dy}$$

**Formel 14**

Die Proportionalitätskonstante  $\eta \left( \frac{N \cdot s}{m^2} \right)$  ist die dynamische Viskosität, welche das Verhältnis zwischen der dynamischen Viskosität  $\eta$  und der kinematischen Viskosität  $\nu$  über die Dichte  $\rho$  definiert. (49)

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

Formel 15

Der unter b.) angeführte Geschwindigkeitsverlauf ist gesichert gegeben, wenn die dimensionslose Reynoldszahl (Re) unter 1160 liegt. Zwischen 1160 und 2300 liegt ein Übergangsbereich, wo sowohl laminare als auch turbulente Strömungen vorherrschen können. (50)

$$Re = \frac{L \cdot \rho_{\text{Isolierflüssigkeit}} \cdot v_{\text{Isolierflüssigkeit}}}{\eta_{\text{Isolierflüssigkeit}}}$$

Formel 16

Bei Rohrströmungen ist die Länge als  $L=d=2r$  definiert. Das Hagen-Poiseuillesche Gesetz dient als Grundlage für das Kapillarviskosimeter. Es besagt, dass der Durchfluss pro Zeiteinheit durch ein Rohr mit einer bestimmten Länge  $L$  und einem Radius  $r$  umgekehrt proportional zur Viskosität  $\eta$  und zur Länge  $L$ , aber direkt proportional zur Druckdifferenz  $\Delta p$  an den Rohrenden und zur vierten Potenz des Rohrradius  $r$  ist. (50)

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L}$$

Formel 17

Für eine Rohrströmung stellt man sich am besten das Bild von unendlich vielen ineinander geschachtelten Zylindern vor, welche sich verschieben, wobei der innerste Zylinder die größte Geschwindigkeit besitzt.

Damit die oben angeführten theoretischen Überlegungen Gültigkeit haben können, gilt die Voraussetzung, dass es sich um eine newtonsche Flüssigkeit<sup>26</sup> handelt. Dann wäre es der Fall, dass  $\tau$  gegen  $\frac{dv}{dy}$  eine zeitunabhängige Gerade mit der Steigung des Viskositätskoeffizienten bildet. Newtonsche Flüssigkeiten kommen aber in der Natur wesentlich seltener vor als nicht newtonsche Flüssigkeiten. Beispiele für nicht newtonsche Flüssigkeiten sind in (51) beschrieben. Es handelt sich um Flüssigkeiten, deren Scherrate jederzeit eine eindeutige Funktion der Schubspannung ist (Zahnpaste, Ölfarben, Kalksuspension) oder deren Schubspannung und Scherrate einer Scherbelastung ausgesetzt sind (Pudding) oder aber es handelt sich um viskoelastische Flüssigkeiten wie Gele oder Polymere.

---

<sup>26</sup> Ist eine Flüssigkeit mit einer linear viskosem Fließverhalten, z.B. Wasser oder Luft



## 4.4 Chemische Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten

### 4.4.1 Flammpunkt

Als Flammpunkt bezeichnet man die Temperatur, bei der sich das Öl aufgrund der Hitze selbst entzündet, vorausgesetzt es liegt eine brennbare Atmosphäre vor (genug Sauerstoff). Bei höheren Temperaturen nimmt die Viskosität des Öls ab und es wird dünnflüssiger. Chemisch gesehen besitzen Flüssigkeiten, welche kurzkettige Kohlenwasserstoffe beinhalten; einen niedrigeren Siedepunkt als langkettige Kohlenwasserstoffe. Dieselbe Auswirkung auf die Viskosität haben kurzkettige Kohlenwasserstoffe. Sie sind weniger viskos als langkettige Kohlenwasserstoffe. Die Zusammensetzung dieser Destillate nennt man Fraktion, abhängig davon hat das Öl eine bestimmte Viskosität. Je nach Wahl der Siedegrenzen kann das Verhältnis der Ölkomponenten beeinflusst werden. Die einzelnen Komponenten können zwar denselben Siedepunkt haben, aber in ihrer Viskosität grundverschieden sein. Der Flammpunkt hängt daher von der Wahl des Komponentenverhältnisses und zugleich von der Viskosität ab.

Je dünner bzw. weniger viskos ein Öl ist, desto niedriger ist der Flammpunkt. Essenziell ist aber, dass der Flammpunkt von Transformatorölen über  $250^{\circ}\text{C}^{27}$  liegt. Ist das Öl hingegen zu dick, anders gesagt zu hoch viskos, ist es aufgrund der Bauform des Transformators nicht mehr möglich eine ausreichende Durchströmung des Transformators zu erlangen und den notwendigen Wärmetransport zu erreichen. Übliche Viskositätsklassen für Transformatoren liegen im Bereich unter  $35 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

### 4.4.2 Brennpunkt

Der Brennpunkt eines Stoffes wird als Temperatur bezeichnet, bei der dessen Dampfdruck so hoch ist, dass sich das entstehende Gas-Luft-Gemisch durch eine externe Zündquelle entzünden lässt und die Verbrennung auch noch weiter fortschreitet, obwohl die Zündquelle entfernt wird. (52 S. 201)

Wichtig ist, dass bei Transformatoren das brennbare Öl eine Betriebstemperatur hat, die wesentlich niedriger als der Flammpunkt ist. Nur so wird verhindert, dass das Öl sich während des Betriebes nur sehr schwer durch eine Zündquelle entzünden lässt. Selbst wenn die Temperatur des Flammpunktes erreicht werden würde, würde das Öl in ausreichender Menge brennbare Dämpfe bilden. Diese Dämpfe lassen sich entflammen aber die nachströmende Dampfmenge ist nicht groß genug, um eine dauerhafte Verbrennung zu ermöglichen, wenn die Zündquelle wieder entfernt wird. Erst wenn der nur wenige Grad

---

<sup>27</sup> Wert lt. ISO 2592

Celsius höhere Brennpunkt erreicht wird, ist die gebildete Dampfmenge ausreichend, um eine dauerhafte Verbrennung zu ermöglichen.

Der Flamm- aber auch der Brennpunkt bei Transformatoren ist laut ISO genormt und liegt bei biologisch abbaubaren Isolierflüssigkeiten, wie dem biologischen Ester, wesentlich höher als bei Mineralölen.

Der Flammpunkt spielt für die Auswahl von Isolierflüssigkeiten eine größere Rolle und hat gegenüber dem Brennpunkt unter Sicherheitsaspekten eine weitaus höhere Bedeutung, da bereits bei der niedrigeren Temperatur des Flammpunktes eine Entzündung von explosionsfähigem Gas-Luft-Gemischen möglich wird. Die dabei entstehende Verbrennungswärme reicht nicht aus, um die Flüssigkeit bis zum Erreichen des Brennpunktes zu erwärmen. Esterflüssigkeiten besitzen die Nachteile des Mineralöls nicht, da ihre Brandlast wesentlich geringer ist, ihr Brennpunkt liegt weit höher und sie sind, aus Sicht der Umweltverträglichkeit betrachtet, wesentlich unkritischer. (53) (54)

Zum Vergleich: Mineralöl besitzt einen Brennwert von 46 MJ/kg (55), der natürliche Ester hingegen 34 MJ/kg (56). Das ergibt für Mineralöl bei einem Leistungstransformator mit 40 t Ölmenge eine gespeicherte Energie von 1840 TJ (nur durch das Öl verursacht, andere brennbare Materialien, wie etwa Zellulose, wurden nicht berücksichtigt). Bei einem mit Ester gefüllten Transformator ist es zwar nur um etwa ein Viertel weniger (gesamt rund 1240 TJ), es gilt jedoch den wesentlich höheren Brennpunkt mit einzubeziehen. Dieser liegt für Mineralöl bei etwa 150°C (57) und für synthetische und natürliche Ester zwischen 300°C und 360°C. (55) (58) (54)

**Tabelle 2: Thermische Eigenschaften der Isolierflüssigkeit (Werte lt. (39) (38))**

<b>Isolierflüssigkeit</b>	<b>Mineralöl</b>	<b>natürlicher Ester</b>
<b>Flammpunkt [°C]</b>	138 - 150	330
<b>Brennpunkt [°C]</b>	165 - 170	360

Bei der Umstellung beziehungsweise Vermischung von ehemals mineralölgefüllten Transformatoren mit alternativen Isolierflüssigkeiten, wie dem biologisch abbaubarem Ester, ist jedoch zu beachten, dass wenn der Transformator beim Wechsel der Isolierflüssigkeit nicht vollständig entleert wird, vor dem Wiederbefüllen laut Hersteller unweigerlich eine Spülung mittels einem auf 50°C erwärmten Esters notwendig ist. Sollte diese Spülung nicht erfolgen, kann es zu einer Vermischung der beiden Isolierflüssigkeiten und dabei zu einer Veränderung der thermischen Eigenschaften, also zu einem niedrigeren Flamm- bzw. Brennpunkt, kommen. Es dürfen laut Datenblatt verschiedener Esterhersteller maximal 5–10% des Mineralöls im Transformator bleiben, um die thermischen Eigenschaften bei einem Retrofill mittels biologischem Ester nicht zu beeinflussen. (59) (60) (45)

### 4.4.3 Wassergehalt

Der Wassergehalt des Isolieröls wirkt sich wesentlich auf die Veränderung der Viskosität aus. Wie jedoch aus (45 S. 21) hervorgeht, wirkt sich der Wassergehalt bei mineralölgefüllten Transformatoren wesentlich stärker auf die Viskosität aus (Viskosität nimmt zu) als bei alternativen Isolierflüssigkeiten wie beispielsweise dem natürlichen Ester. Beim Ester ist die Feuchtigkeitsaufnahme während des Betriebs von Transformatoren relativ gesehen so gering, dass sie bei der Auslegung der Geräte nicht berücksichtigt werden muss.

### 4.4.4 Grenzflächenspannung

Anhand der Grenzflächenspannung lässt sich qualitativ aber sehr sensitiv Maß dafür nehmen, wie es um die Alterung des Öls steht. Dabei misst man die aufgrund der Oxidation gebildeten Tenside<sup>28</sup>. Diese wirken sich auf die Oberflächenspannung aus, welche bei einem Wert von unter 28 mN/m ein Indikator dafür ist, dass es zu Schlammablagerungen (gilt nur beim Mineralöl) im Isolieröl und in weiterer Folge im Transformator kommt. Sollte der Wert unter 15mN/m sein, ist in der Praxis davon auszugehen, dass der Transformator schon sehr verschlammmt ist und die dielektrischen Parameter des Öls sich innerhalb kurzer Zeit drastisch verschlechtern können. (61)

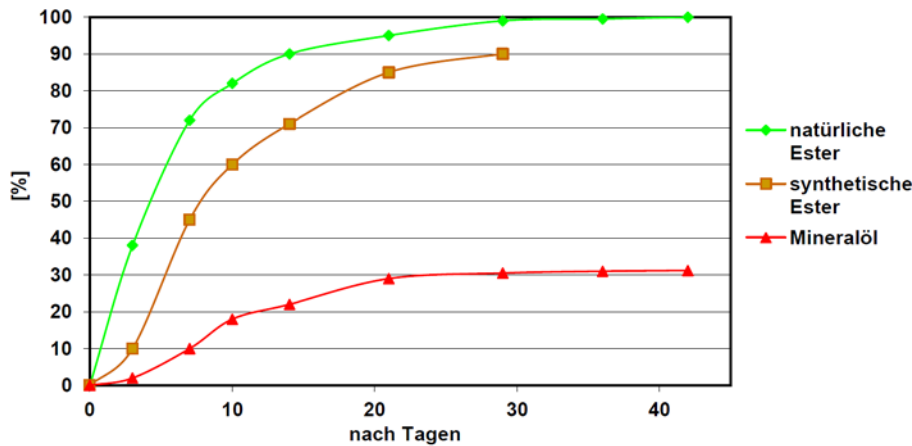
Die Höhe der Grenzflächenspannung wird mit in die Entscheidung einbezogen, ob ein Transformatoröl regeneriert oder ersetzt werden soll. (62) Bei biologischem Ester ist die Grenzflächenspannung aufgrund der höheren Polarität und der damit verbundenen Wechselwirkung mit Wasser von Haus aus geringer als bei herkömmlichem Mineralöl und hat somit eine geringere Relevanz.

---

<sup>28</sup> Tenside sind sehr oberflächenspannungsaktive Substanzen.

## 4.5 Biologische Eigenschaften

Abbildung 27 zeigt eine aus (63) entnommene Zusammenstellung über die biologische Abbaubarkeit der gängigsten Isolierflüssigkeiten (Darstellung in Prozent).



**Abbildung 27: biologische Abbaubarkeit der einzelnen Isolierflüssigkeiten (63)**

Wie schon in der Einleitung erwähnt, hat die biologische Abbaubarkeit von Isolierflüssigkeiten in der Zeit der Verwendung von erneuerbaren Energiequellen stark an Bedeutung gewonnen. In Abbildung 27 ist erkennbar, dass im Falle eines Austritts von Mineralöl nur eine 30-prozentige Abbaubarkeit der Isolierflüssigkeit nach 30 Tagen gegeben ist, während beim natürlichen Ester schon nach einem Monat beinahe 100 Prozent der Stoffe von der Natur abgebaut werden können und somit im Falle eines Gebrechens eine wesentlich unbedenklichere Situation für Umwelt; Grundwasser, Flora und Fauna darstellt. Chemische Hintergründe für diese bessere Abbaubarkeit von Ester sind im Wesentlichen auf den Umstand des Wasserhaushaltes zurückzuführen und aus (63 S. 74ff) zu entnehmen. Neben der biologischen Abbaubarkeit hat natürlicher Ester aufgrund seiner Produktion, die zu 100 Prozent aus gepressten Sojabohnen besteht, auch eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz (Abbildung 28).

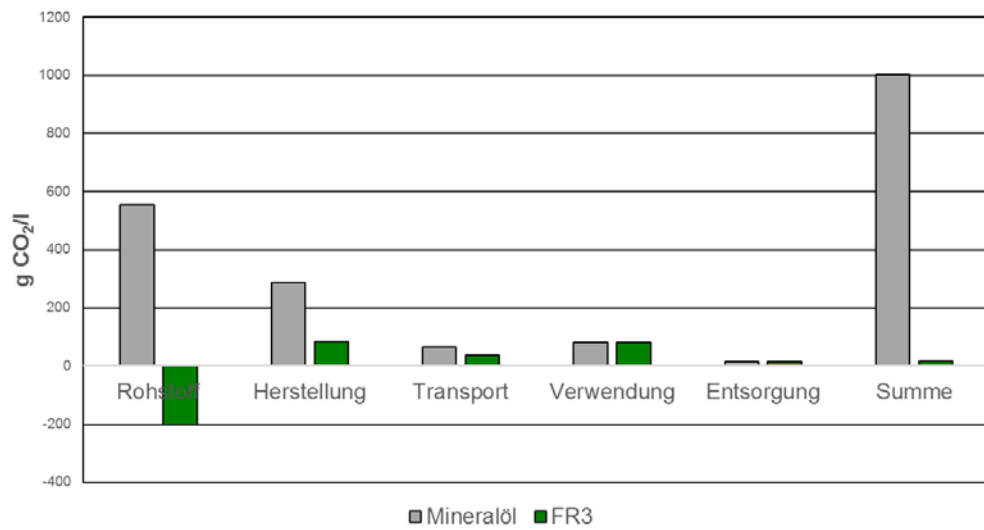


Abbildung 28: CO2 Emissionen in 30 Jahren (64)

#### 4.5.1.1 Zusammenfassung der Kennwerte

In Tabelle 3 sind die Grenzwerte laut Norm mit zugehöriger Vorschrift und Einheit sowohl von Mineralöl als auch biologischem Ester gegenübergestellt.

Eigenschaft	Einheit	Vorschrift	Grenzwert lt. Norm	biologischer Ester Envirotemp FR3 <sup>29</sup>	Mineralöl <sup>30</sup>
Durchschlagspannung	kV	IEC 60156	>45	55	60
Verlustfaktor		IEC 60247	<30 10 <sup>-4</sup>	10 10 <sup>-4</sup>	10 10 <sup>-4</sup>
Dielektrizitätszahl $\epsilon_r$				3,3	2,2
Pourpoint	°C	ISO 3016	<-45	-50	-40
Flammpunkt	°C	ISO 2592	>250	257	135-145
Brennpunkt	°C	ISO 2719	>300	310	150-175
kinematische Viskosität bei 40°C	mm <sup>2</sup>	ISO 3104	< 35	33	20
Grenzflächenspannung	mN/m		>28	20-30	40-50
Wassergehalt	[mg/kg]	IEE C57.147	<100	20	20-30

Tabelle 3

<sup>29</sup> Werte aus Produktdatenblatt ENVIROTEMP® FR3™ Fluid (Bulletin 00092) Product Information June, 2001

<sup>30</sup> Werte von Website: [substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mineral\\_transformer\\_oil](http://substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mineral_transformer_oil) (aufgerufen am 18.7.2017)

## 5 Umsetzung

Im folgenden Kapitel wird untersucht, von welchen Faktoren die Möglichkeit eines Retrofills abhängt und ob die einzelnen Transformatorwerkstoffe miteinander kompatibel sind. Aufgrund eines vereinfachten Beispiels wird die Kühlleistung für eine Ölumstellung beziehungsweise die notwendige Durchströmung aufgrund des unterschiedlichen viskosen Verhaltens von Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur bei gleichbleibendem Transformator design nachgerechnet.

### 5.1 Kompatibilität der verwendete Stoffe im Transformator

Chemische Wechselwirkungen zwischen dem Dielektrikum und den verwendeten Transformatorwerkstoffen sind unerwünscht. Ein wesentliches Merkmal einer brauchbaren, elektrisch nicht-leitenden Isolierflüssigkeit ist aus chemischer Sicht, dass sie sich möglichst inaktiv gegenüber den mit ihr in Kontakt stehenden Materialien verhält und die festen Materialien im Transformator möglichst entlastet. In den folgenden Kapiteln wurde die Kompatibilität von folgenden Transformatorwerkstoffen untersucht. (65)

- Eisenkern/ Öltank
- Kupferwicklung
- Dichtungen
- Zellulose Material

#### 5.1.1 Eisenkern/ Öltank

In Bezug auf die Materialkompatibilität gibt es beim Eisenkern keine Probleme bei der Umstellung von Mineralöl auf Ester. Es wird sowohl beim synthetischen als auch beim natürlichen Ester dasselbe Elektroblech verwendet wie bei Mineralöl. (66) Der Lack, mit welchem das geschichtete Elektroblech überzogen ist, hat bei Labortests keine Veränderungen aufgewiesen.

In Bezug auf den Faltwellenkessel ist eine Umstellung des Isolieröls unbedenklich, da die Dimensionierung des Kessels gleich ist wie bei mineralölgefüllten Transformatoren. Aufgrund der höheren Permittivitätszahl und der thermischen Eigenschaften könnte sogar eine kompaktere Bauweise gewählt werden. Dies ist bei Retrofill jedoch nicht von Relevanz. Auch verzinkte Kessel, welche aber heutzutage nicht mehr für Mineralöltransformatoren verwendet werden, wären für Esteranwendungen geeignet. Da es in der Vergangenheit aber vermehrt zu chemischen Reaktionen von verzinktem Blechen mit Mineralöl gekommen ist, werden diese schon seit Jahrzehnten nicht mehr verwendet. Bei verzink-

ten Kesseln würde der Einsatz von Ester aber keine Auswirkung auf die Oberfläche des Kessels haben, da aufgrund des langkettigen Estermoleküls der Säuregrad bei einer eventuellen Alterung wesentlich geringer ist als bei den kurzkettigen Mineralölmolekülen. Eine Umstellung der Isolierflüssigkeit des Öltanks ist daher im Zuge dieser Studie als unproblematisch zu betrachten.

### 5.1.2 Kupferwicklung

Bei der Kupferwicklung hat der korrosive Schwefel in manchen Ländern zu alarmierenden Ausfällen geführt. Isolieröle auf Mineralölbasis haben Schwefelverbindungen beinhalten, welche in Verbindung mit der Kupferwicklung Kupfersulfid gebildet haben. Dieses Kupfersulfid entsteht und ist ein blau bis grau-schwarzes Pulver, welches Strom gut leitet - man spricht in diesem Fall von korrosivem Schwefel. Dieses Pulver wirkt sich negativ auf die Papierummantelung der Kupferleiter aus. Abbildung 29 zeigt ein Beispiel einer Papierprobe von einem Kupferleiter mit Kupfersulfidablagerungen.

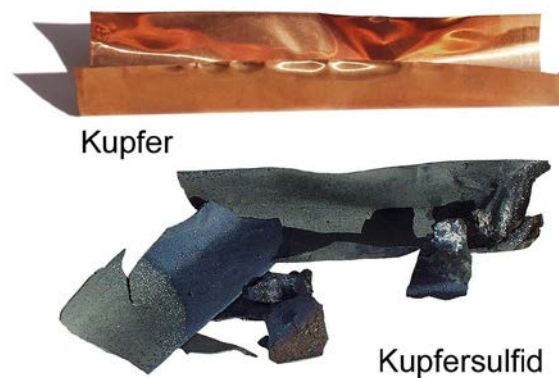


Abbildung 29: Kupfer - Kupfersulfid (67)

Wie aus der Literatur (45 S. 36) hervorgeht, kommt es bei der Verwendung von biologischem Ester als Isolierflüssigkeit zu keinen Kupfersulfidablagerungen. Weniger Ablagerungen bedeuten, dass im Papier, mit welchem die Kupferwicklung ummantelt ist, weniger elektrisch leitende Kupfersulfid Verbindungen entstehen und sich somit mit der Alterung keine Verschlechterung der Isolationseigenschaften des Papiere erkennen lassen. Die Esterflüssigkeit wirkt sich also chemisch gesehen wesentlich positiver auf das Alterungsverhalten der Kupferwicklung aus.



### 5.1.3 Dichtungen

In (68) (Basisflüssigkeiten für Schmierstoffe) werde Probleme der Schmierstoffe auf Basis des natürlichen Esters aufgrund ihrer geringen Verträglichkeit mit Elastomeren und Lacken beschrieben. Speziell niedrigviskose Esterflüssigkeiten, welche für dünnflüssige Metallbearbeitungsöle verwendet werden, verhalten sich gegenüber Dichtungs- und Isoliermaterialien sehr aggressiv. Da jeder ölgefüllte Transformator mit einer großen Anzahl von Öl-Zu- und Ableitungen, Flanschen, Inspektionsöffnungen, Ölentnahmestutzen und Durchführungsöffnungen versehen ist, ist bei einer Ölumstellung die Beständigkeit der Dichtungen zu überprüfen.

Bei mineralölgefüllten Transformatoren werden standartmäßig NBR<sup>31</sup>-Dichtungen verwendet, diese sind von den Herstellern für die Trafoölbeständigkeit optimiert und langjährig getestet. Die Temperaturbereiche der Nitril-Butadien-Kautschuk-Dichtungen liegt bei maximal 90°C. Da bei der Umstellung von Mineralöl auf Ester die Betriebstemperatur des Transformators laut Ester-Herstellern um mindestens 10 K angehoben werden kann, müssen sämtliche Dichtungen am Transformator durch FKM<sup>32</sup>-Dichtungen ersetzt werden. Fluorkarbonkautschuk hat eine erhöhte Hitzebeständigkeit und kann kurzzeitig sogar bei 200°C verwendet werden, ohne an seine physikalischen Grenzen zu kommen. Der Tausch eines gesamten Dichtungssatzes bei einem Transformator kann vor Ort erfolgen und wurde bereits bei mehreren Anlagen durchgeführt. Im Zuge der Anfrage bezüglich der Materialkompatibilität der Dichtungen gab es auch einen Hersteller, der von seiner Esterflüssigkeit behauptet hat, dass die Dichtungen des Transformators trotz der nachgewiesenen Unbeständigkeit nicht ausgetauscht werden müssen, da selbst wenn sich die Dichtungen chemisch zersetzen Ester bei der Zersetzung des Nitril-Butadien-Kautschuks eine Schutzschicht bildet, welche die Funktion der Dichtung übernimmt. Aus Sicht der Dichtungen steht einer Umstellung der Isolierflüssigkeit nichts im Wege, jedoch nur unter der Voraussetzung, dass der gesamte Dichtungssatz des Transformators ausgetauscht wird.

(69)

### 5.1.4 Zellulose Material

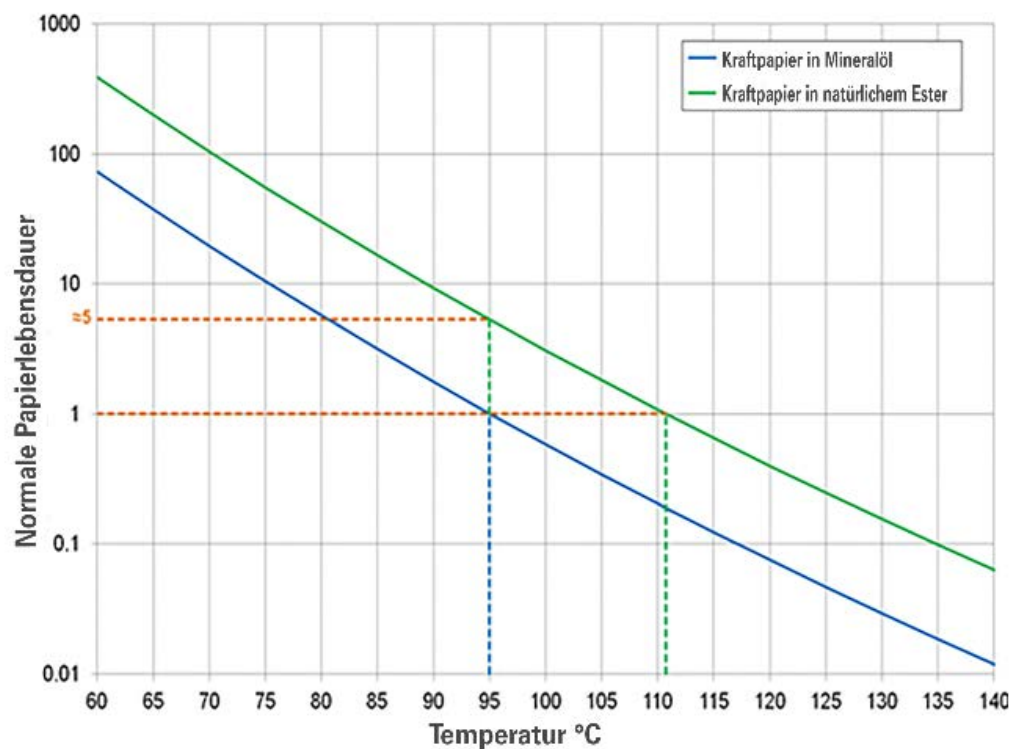
Durch die Verwendung von Transformatorflüssigkeiten auf Esterbasis kann die Lebensdauer der zelluloseisolierten Transformatoren entscheidend verlängert werden. Das Zellulosematerial im Transformator bestimmt die Lebensdauer maßgeblich. Das Papier dient nicht nur der elektrischen Isolierung, sondern auch der mechanischen Integrität. Wenn das Papier brüchig wird, ist der Transformator nicht mehr widerstandsfähig gegenüber Fehlern, wie beispielsweise Kurzschlüsse. Durch eine Umfüllung von Mineralöl auf biolo-

---

<sup>31</sup> Nitril-Butadien-Kautschuk

<sup>32</sup> Fluorkarbonkautschuk

gischen Ester können höhere Betriebstemperaturen gefahren werden. Die Lebensdauer wird dadurch im Vergleich zu Mineralöl jedoch nur eingeschränkt verkürzt. Die Forschung begründet dieses Ergebnis damit, dass die Feuchtigkeit und die Temperatur die wichtigsten Faktoren bei der Alterung des Zellulosematerials sind. (70) Bei Mineralöl verbleibt die Feuchtigkeit des Papiers im Papier, da die Hygroskopizität von Mineralöl aufgrund des Aufbaus der Moleküle begrenzt ist. Der Vorteil der längeren Lebensdauer gilt grundsätzlich für Transformatoren mit thermostabilisierten Papier oder für mit Normalpapier isolierten Kupferwicklungen. Bei Nomex oder Pressboard ist diese Lebensdauererlängerung nicht in dem Ausmaß relevant, da die Hygroskopizität des Papiers wesentlich höher ist. Abbildung 30 stellt die Lebensdauererlängerung bei der Verwendung von Normalpapier dar.



**Abbildung 30: Diagramm der Lebensdauererlängerung des Papiers (70)**

Die Auswirkungen von Ester auf das Zellulosematerial wurden in (45) ausführlich untersucht. Sie wirken sich positiv auf die Alterung des Zellulosematerials aus und decken sich mit den Aussagen der Abbildung 30. Eine Umstellung des Isolieröls von Mineralöl auf biologischen Ester wirkt sich somit positiv auf die Zellulose aus und kann die Papierlebensdauer auf das 5- bis 8-fache verlängern. (71)

## 5.2 Einfluss auf das Kühlsystem

Die höhere Betriebstemperatur bei der Umstellung auf biologischen Ester fordert neue dielektrische und thermische Konstruktionsüberlegungen.

### 5.2.1 Dielektrische Konstruktionsüberlegungen

Da in einem Isoliersystem aus flüssigen und festen Dämmstoffen eine sehr unterschiedliche elektrische Belastung der Dielektrika vorliegt, ist es notwendig, auch diese Kompatibilität hinsichtlich der Konstruktion zu untersuchen. Die Dielektrizitätskonstanten von Esterflüssigkeiten sind typischerweise höher als die von Mineralöl und näher an der Dielektrizitätskonstante von Pressboard und Isolierpapier. Durch die Umstellung der Isolierflüssigkeit ergibt sich daher eine geringere Disparität bei der Verteilung der Spannungen zwischen Feststoff und Flüssigkeit als bei Mineralöl und Pressboard. Die Teilentladung erfolgt erst bei wesentlich höheren Spannungen als bei mineralölgefüllten Transformatoren. Wie aus der Literatur (53) hervorgeht, haben Testergebnisse gezeigt, dass bei kleineren Isolationsabständen und natürlichem Ester als Isoliermedium die Durchschlagsspannung sowohl bei Wechsel- als auch bei Impulsspannung höher ist als bei größerem Isolationsabstand mit Mineralölfüllung. Aus Sicht der Ausbreitung des elektrischen Feldes im Transformator ist eine Umstellung des Isolieröls daher mit großen Vorteilen verbunden. Der biologische Ester hat eine wesentlich höhere elektrische Permittivität als Mineralöl, somit wird die Hauptintensität des elektrischen Feldes vom Papier in die Isolierflüssigkeit verschoben und die Zellulose weniger stark beansprucht.

### 5.2.2 Thermische Konstruktionsüberlegungen

Wegen der merklich höheren Viskosität von Esterflüssigkeiten im Vergleich zu Mineralöl ist die Strömung von Esterflüssigkeiten durch die Wicklungen, Kern- und Kühleinrichtungen niedriger als jene von Mineralöl. Es kommt daher zu einer relativen Zunahme der oberen Öl-, Wicklungs-, und Kerntemperatur. Gleichzeitig hat der natürliche Ester aber eine höhere Wärmeleitfähigkeit und eine höhere Wärmekapazität. Diese besseren thermischen Eigenschaften können jedoch die negativen Auswirkungen, welche durch die höhere Viskosität von Ester auftritt, nur in kleinem Maß kompensieren, denn bei großen Transformatoren wird der Wärmetransport hauptsächlich durch natürliche Konvektion bestimmt. Es ist daher notwendig, das Design der Wicklung, des Kerns und des Kühlsystems zu optimieren, um die thermische Dynamik im Transformator auch mit Esterflüssigkeit konstant zu halten. Nur durch die exakte Dimensionierung der Kanäle und der Ölpumpen kann die erforderliche Kühlwirkung bei mit Ester gefüllten Großtransformatoren erreicht werden. In diesem Abschnitt wird beispielhaft die Durchflutung der einzelnen Windungskerne sowie die Wärmeübertragung berechnet. Aufgrund der unterschiedlichen Viskosität von Esterflüssigkeiten ist es bei der Umstellung des Öls notwendig, die Kanaldurchströmung des Fluids nachzurechnen.

Zur Veranschaulichung wurden folgende Daten eines 410 kV-Transformators herangezogen. Im Transformator befindet sich eine Gesamtölmenge von 6.000 Litern Mineralöl; jeder einzelne der drei Schenkeln wird also von 2000 Litern Öl durchflossen. Die Querschnittsfläche der einzelnen Kanäle beträgt  $14.010,1 \text{ mm}^2$ . Laut Herstellerangaben ist die Wicklung auf eine Durchströmung von 33,3 Litern/ Sekunde ausgelegt. Ob die notwendige Durchströmung mit den momentan verwendeten Pumpen ausreicht wird nachfolgend beispielhaft berechnet.

Folgende Daten wurden für die Berechnung verwendet:

Viskosität von Mineralöl:

$$v_{(60^\circ\text{C})} = 5,5 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$v_{(80^\circ\text{C})} = 3,6 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Viskosität von biologischem Ester

$$v_{(60^\circ\text{C})} = 20 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$v_{(80^\circ\text{C})} = 16 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$Q = \dot{v} * A$$

$$\dot{v} = \frac{Q}{A}$$

$$\dot{v} = \frac{33,3 \text{ dm}^3}{1,4 \text{ dm}^2} = 23,8 \frac{\text{dm}}{\text{s}}$$

$$\dot{v} = 0,238 \frac{\text{dm}}{\text{s}}$$

$$A = \frac{d^2 * \pi}{4} \quad A \dots \text{Querschnittsfläche der Kanäle}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$d = 133,6 \text{ mm}$$

$$\text{Mineralöl} \quad Re_{(60^\circ\text{C})} = \frac{\dot{v} * d}{v} = \frac{238 \text{ mm} * 133,6 \text{ mm} * \text{s}}{5,5 \text{ mm}^2} = 5781$$

$$Re_{(80^\circ\text{C})} = 8832$$

Bei der Verwendung von Mineralöl ergeben sich Reynoldszahlen ( $Re$ ) im Bereich von 5781 und 8832. Es liegt also eine turbulente Strömung vor. (72)

Ester:

$$Re_{(60^{\circ}C)} = 1590$$

$$Re_{(80^{\circ}C)} = 1987$$

**Formel 19**

Aufgrund der Reynoldszahl errechnet sich die Fließgeschwindigkeit der einzelnen Kanäle.

Für 60°C errechnet sich:

$$v_{(Mineralöl)} = 238 \text{ mm/s}$$

$$v_{(biolog.Ester FR3)} = 865 \text{ mm/s}$$

**Formel 20**

Für 80°C errechnet sich:

$$v_{(Mineralöl)} = 238 \text{ mm/s}$$

$$v_{(biolog.Ester FR3)} = 1058 \text{ mm/s}$$

**Formel 21**

Wie aus (43) hervorgeht ist für ölgekühlte Transformatoren eine turbulente Durchströmung der Wicklung erforderlich. Diese liegt erst ab einer Reynoldszahl von 2300 vor. Wie aus Abbildung 31 ersichtlich ist, wird bei der turbulenten Strömung das Öl im inneren der Kanäle wesentlich besser vermischt als bei laminarer Strömung.

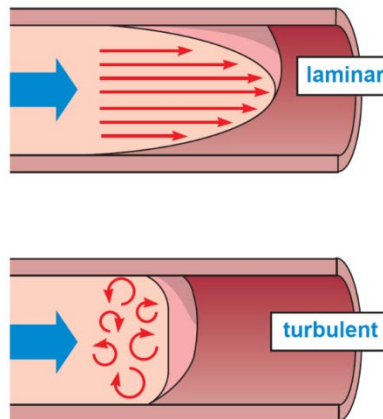


Abbildung 31: Laminare- Turbulente Strömung (73)

$$\text{biolog. Ester FR3} \quad \dot{v} = \frac{2300 \cdot 20}{133,6} = 344,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Mineralöl} \quad \dot{v} = \frac{2300 \cdot 16}{133,6} = 275,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Formel 22

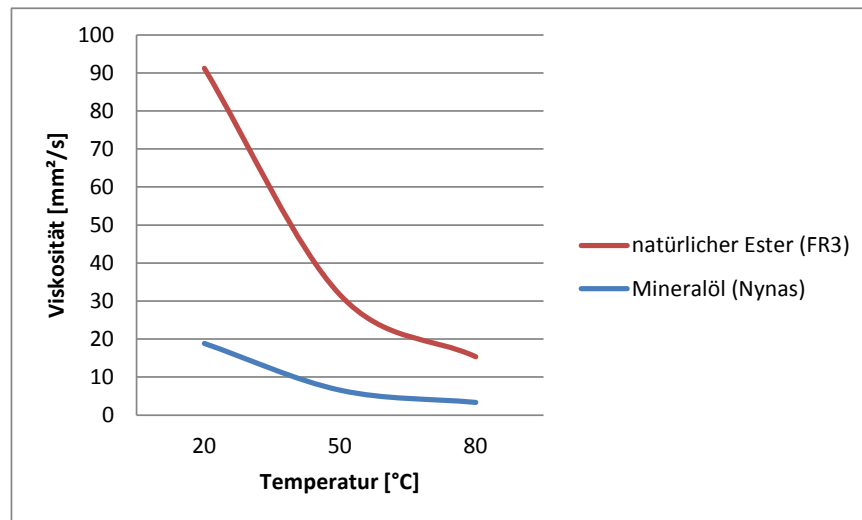
238 mm	100 %	x = 144,7 % bei 60 °C
344,3 mm	xxx %	x = 115,7 % bei 80 °C

Laut der errechneten Ergebnisse ist ersichtlich, dass die Fördergeschwindigkeit um 44% gesteigert werden muss, um denselben Wärmeabtransport aus der Wicklung zu ermöglichen. Da die Wärmeleitfähigkeit, wie schon im Kapitel Wärmeleitfähigkeit beschrieben, bei natürlichem Ester temperaturabhängig ist und bei der Berechnung immer vom Bezugspunkt von 25 ausgegangen wurde, kann die notwendige Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit über die bessere Wärmeleitfähigkeit vom Ester kompensiert werden. Diese nimmt beim Erreichen der Betriebstemperatur mindestens von 0,12 auf 0,17 (W/m\*K) zu, was einer Zunahme von ca. 42% entspricht. Eine Umstellung der Pumpenleistung ist somit aufgrund der Fördergeschwindigkeit nicht notwendig.

### 5.2.3 Pumpenleistung

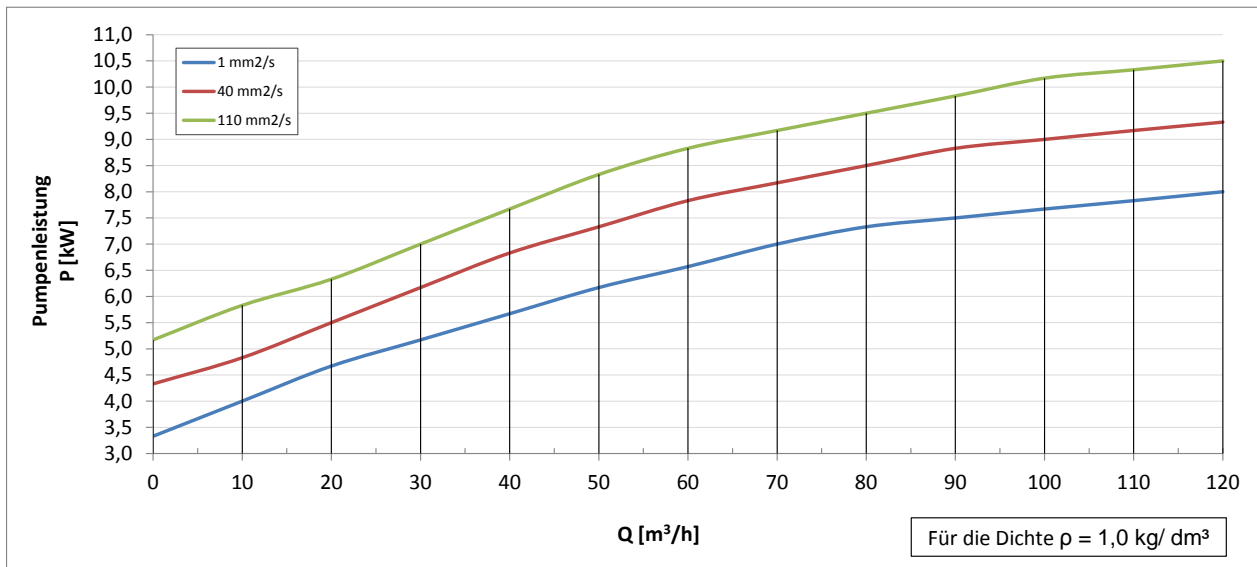
Die Pumpenleistung muss bei der Verwendung von natürlichem Ester jedoch trotz der erworbenen Kenntnisse im vorigen Abschnitt hinsichtlich Viskosität überprüft werden, um sichergehen zu können, dass die höhere Viskosität, welche der natürliche Ester bei niedrigen Temperaturen aufweist, keine Probleme im kühlen Arbeitsbereich des Transforma-

tors verursacht. Die Unterschiede zwischen Mineralöl und natürlichem Ester hinsichtlich Viskosität bei niedrigen Temperaturen sind in Abbildung 32 dargestellt.

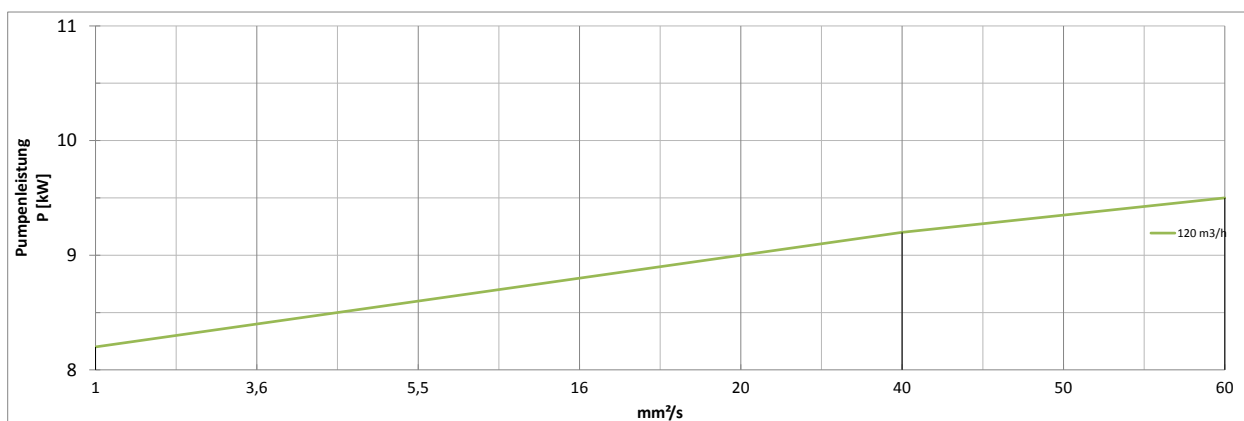


**Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur (Daten aus (45))**

Die benötigte Pumpenleistung ist in der Regel etwas höher als bei gewöhnlichem Mineralöl, da die erforderlichen Durchflussmengen bei niedrigen Betriebstemperaturen sonst nicht erreicht werden können. Dazu wurden in Abbildung 33 Kennwerte eines Pumpenherstellers (siehe Quelle 68) herangezogen und es wurde eine Grafik erstellt. Die Herstellerangaben sind jedoch nur bis zu einer Fördermenge von 110m³ bekannt. Mit Hilfe dieser vorhandenen Daten wurde auf eine Förderleistung von 120 m³ extrapoliert. (Abbildung 33)



**Abbildung 33: Pumpenleistungsabhängigkeit / Viskosität des Fördermediums (68)**



**Abbildung 34: Zusammenhang von Pumpenleistung zu Viskosität bei 120m³/h (adaptiert aus (68))**

In Abbildung 34 ist ein deutlicher Leistungsunterschied in Abhängigkeit der Viskosität und der Fördermenge der Pumpe ersichtlich. Betrachtet man die Werte für den oben angeführten mineralölgefüllten 410 kV/ 540 MVA Transformator, so kommt man auf folgendes Ergebnis:

Mineralöl hat eine Viskosität, die bei 50°C bei 5,5mm²/s liegt. Natürlicher Ester liegt im Vergleich dazu bei 20mm²/s. Bei einer Fördermenge von 120m³, wie sie beim angeführten Transformator benötigt wird, lässt sich somit eine um 0,5 kW höhere Pumpenleistung ermitteln.

Sollte die Zwangsumlaufpumpe über diese Pumpenleistung nicht verfügen, muss sie bei der Umstellung auf natürlichen Ester ausgetauscht werden.



## 6 Erkenntnisse und Ausblick

Die größte Herausforderung bei der Umstellung des Isolieröls stellen nicht die elektrischen Eigenschaften sondern die Wärmeabfuhr über das Isolieröl dar. Durch die Verluste, die bei der Magnetisierung des Eisenkerns und den ohmschen Widerständen der Wicklung entstehen, kommt es bei Großtransformatoren zu einer großen Wärmemenge, welche aus dem Inneren des Transformators abtransportiert werden muss. Die Literaturstudie zeigt, dass die Wärmeabfuhr bei der Umstellung auf den natürlichen Ester sowohl bei der Kühlung mittels natürlicher Konvektion als auch bei einem erzwungenen Fluidumlauf beherrschbar ist.

Im Zuge der Machbarkeitsstudie wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- ✓ bedingt durch den chemischen Aufbau von natürlichem Ester ist die Umstellung des Isolieröls aufgrund der Kompatibilität der Transformatorwerkstoffe, wie der Kupferwicklung, Cellulose und dem Eisenkern, jederzeit möglich.
- ✓ wenn im Transformator NBR-Dichtungen verbaut sind, ist der gesamte Dichtungssatz des Transformators auszutauschen und durch Fluorkautschuk Dichtungen zu ersetzen.
- ✓ die vollständige Entleerung sowie ausreichend Zeit zum Abtropfen des Aktivteils vom Transformator ist zu gewährleisten, da sich bei einem Mischverhältnis von >7% Mineralöl im natürlichen Ester der Flamm- und Brennpunkt bei der Befüllung mit natürlichem Ester drastisch senkt.
- ✓ der Vorteil der besseren dielektrischen Eigenschaften des natürlichen Esters sowie die kleinere Dimensionierungsmöglichkeit des Transformators, kann bei Retrofill wegen des bereits vorgegebenen Designs leider nicht ausgeschöpft werden.
- ✓ bei kleineren Transformatoren (bis 30 MVA) ist Retrofill ohne eine Nachberechnung des Kühlsystems des Transformators möglich, da bei 99% der Anwendungen keine Zwangsumlaufkühlung des Transformators verbaut ist. Bei Kühlung mittels natürlicher Konvektion ist lediglich die Umgebungstemperatur am Standort zu berücksichtigen, da natürlicher Ester im Gegensatz zu Mineralöl ein wesentlich schlechteres Kaltfließvermögen aufweist.
- ✓ das viskose Verhalten von natürlichem Ester ist vor allem bei Temperaturen unter 80 °C sehr unterschiedlich verglichen mit dem von Mineralöl
- ✓ bei zwangsgekühlten Transformatoren ist nur eine geringe Leistungssteigerung der Ölpumpen notwendig, da die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit sich vor allem mit der besseren Wärmeleitfähigkeit des Öls kompensieren lässt und daher nur die erhöhte Viskosität des natürlichen Esters in den unteren Temperaturbereichen eine etwas höhere Pumpenleistung erfordert.

- ✓ die Betriebssicherheit des Transformator erhöht sich durch die Umstellung des Isolieröls dahingehend, dass bei Austritt aufgrund der biologischen Abbaubarkeit von Ester mit keinen Umweltfolgen zu rechnen ist. Die Überlastfähigkeit bei Engpasssituationen im Verteilungsnetz kann durch höhere Wicklungstemperaturen sicherer bewerkstelligt werden, da der Wärmeabtransport bei höherer Temperatur sich im Vergleich zu Mineralöl durch natürlichen Ester verbessert und Cellulose aufgrund der Eigenschaft von natürlichem Ester, der Cellulose das Wasser zu entziehen, höhere Temperaturen verträgt.
- ✓ natürlicher Ester wirkt sich aufgrund seiner höheren Hygroskopizität positiv auf die Lebenszeit der Zellulosematerialien im Inneren des Transformators aus, da die Durchschlagsspannung trotz des höheren Wassergehalts im Ester noch immer im Bereich des Mineralöls liegt.
- ✓ selbst wenn der Transformator über längere Zeit im Grenzlastbereich/ höheren Temperaturbereich betrieben wird, kommt es zu keiner beschleunigten Alterung des Zellulosematerials.

Größere Leistungstransformatoren sind mit Stufenschaltern zur Lastflussregulierung ausgestattet. Die Kompatibilität der Lastschalter wurde im Zuge dieser Literaturstudie nicht untersucht. Natürlicher Ester stellt eine brauchbare Alternative zum Mineralöl dar. Die Hauptanwendungsgebiete für Retrofill sind aus heutiger Sicht Ballungszentren, in denen Ester durch den geringeren Platzbedarf (geringere Abstände zu Gebäuden oder anderen Transformatoren) und das geringere Brandrisiko im Fehlerfall ohne Zweifel einen großen Beitrag für die gesicherte Stromversorgung leisten kann. Für eine tatsächliche Umstellung von Mineralöl auf natürlichen Ester bei Großtransformatoren ist jedoch eine detaillierte Untersuchung des jeweiligen Transformators sowie der Durchführungen notwendig. Transformatoren, die nicht hermetisch verschlossen sind, sind für eine Umstellung des Isolieröls nicht geeignet. Die wirtschaftlichen Faktoren müssen von Fall zu Fall überprüft werden.

## 7 Literaturverzeichnis

1. **Küchler, Andreas.** *Hochspannungstechnik.* Würzburg - Schweinfurt : Springer Berlin Heidelberg, 2005.
2. **Hartig, Prof.** Grundlagen der Stromversorgung . Weiz : s.n., 2015. Bd. Energiesystemtechnik 2, Skript .
3. 3M: Datenblatt 3M Fluoriniertes Elektronisches Flüssig FC-40; 3M Electronics Markets Material Division. 2010.
4. **F.Moeller, Paul Vaske I.** *Elektrische Maschinen und Umformer.* Hamburg : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1976.
5. **Erwin Böhmer, Dietmar Ehrhardt, Wolfgang Oberschelp.** *Elemente der angewandten Elektronik.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010.
6. [Online] [Zitat vom: 29. 03 2017.]  
[https://www.google.at/search?q=wirbelstromverluste&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiqxJ2o8LXVAhXCOxQKHVFdDR4Q\\_AUICigB&biw=1536&bih=729#imgsrc=aT8mqAfmAPJJgM:&spf=1501585078765](https://www.google.at/search?q=wirbelstromverluste&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiqxJ2o8LXVAhXCOxQKHVFdDR4Q_AUICigB&biw=1536&bih=729#imgsrc=aT8mqAfmAPJJgM:&spf=1501585078765).
7. **Stiny, Leonhard.** *Grundwissen Elektrotechnik.* s.l. : Franzis Elektronik, 2000.
8. **Hänicke, Philipp.** *Magnetische Permeabilität.* s.l. : GRIN Verlag, 2015.
9. [Online] [Zitat vom: 26. 03 2017.] <http://www.bre-trafo.de/de/produkte/technische-informationen/fachbeitraege/unicore-transformatoren-und-drosseln%20.php>.
10. Transformatoren. Heft 6, 2006, JG.105 .
11.  
[http://m.energy.siemens.com/hq/de/stromuebertragung/transformatoren/verteiltransformatoren/assets/09\\_designed-for-you/siemens-geafol-dry-type-transformer\\_1x.jpg](http://m.energy.siemens.com/hq/de/stromuebertragung/transformatoren/verteiltransformatoren/assets/09_designed-for-you/siemens-geafol-dry-type-transformer_1x.jpg). [Online] [Zitat vom: 17. 05 2017.]
12. **D., Sumereder.** *Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik.* s.l. : Österreichischer Verband für Elektrotechnik Wien, 2010.
13. **Rusa.** Rusa GmbH. [Online] <https://www.rusa-transformatoren.at/transformatoren/einphasentransformatoren>.

14. **Faruku.** [Online] [Zitat vom: 13. 04 2017.]  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Leistungstrafo\\_Wicklungen.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Leistungstrafo_Wicklungen.jpg).
15. [Online] [Zitat vom: 30. 05 2017.]  
[http://www.ibn.ch/HomePageSchule/Schule/GIBZ/07\\_Elektrotechnik\\_Grundlagen/07\\_Grafiken\\_Bilder/Buchholzschutz.gif](http://www.ibn.ch/HomePageSchule/Schule/GIBZ/07_Elektrotechnik_Grundlagen/07_Grafiken_Bilder/Buchholzschutz.gif).
16. **Springer, Günter.** *Fachkunde Elektrotechnik*. Wuppertal : Europa-Lehrmittel-Verlag, 1989. ISBN 3-8085-3018-9.
17. *Siemens Prüflabor für Transformatoren Materialien.* [Online] [Zitat vom: 21. 05 2017.]  
[https://www.google.at/search?q=dga+analyse&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiM9MO-sIHVAhVCVxoKHe9gCWQQ\\_AUICigB&biw=1600&bih=790#imgrc=mHOGVojCcV0jM:&spf=1499781240090](https://www.google.at/search?q=dga+analyse&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiM9MO-sIHVAhVCVxoKHe9gCWQQ_AUICigB&biw=1600&bih=790#imgrc=mHOGVojCcV0jM:&spf=1499781240090).
18. Chemielexikon. [Online] [Zitat vom: 17. 05 2017.]  
<http://www.internetchemie.info/chemie/gaschromatographie.htm>.
19. **C57.104, IEEE.** IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers. 2009. IEEE Std C57.104-2008.
20. **E. Fohry, M. Beltle, A. Müller, M. Siegel, S. Tenbohlen.** Neue Methodik der Trafozustandsüberwachung. Universität Stuttgart : Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), 2011.
21. **Lick, Dipl.-Ing.Dr.techn. Werner.** Analyseverfahren der Isolierstoffe. TU Graz : s.n., 2011.
22. **Knab, Hans-Josef.** Die Betriebsüberwachung von Transformatoren. 1996. Bd. 21, Bulletin SEV/WSE .
23. **Ch, Kuen.** Alterung von Zellulosematerialien des Öl-Papier-Isolationssystems. *Dissertation*. TU-Graz : s.n., 2010.
24. **H.P., Moser.** *Transformerboard*. Rapperswil : H.Weidmann AG, 1979.
25. **Moser H.P., Dahinden V.:** *Transformerboard II*. Rapperswil : H. Weidmann AG, 1987.
26. **AB, Nynas.** Base oil handbook. [Online] [Zitat vom: ] <http://www.nynas.com>.
27. **Gastinger, Christian.** Dielektrische Vergleichsmessungen an repräsentativen Öl-Board Anordnungen. Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement TU-Graz : s.n., 2011.
28. **Tkotch, Klaus.** *Fachkunde Elektrotechnik*. Wien : Europa Lehrmittelverlag, 2009.

29. Uni-Rostock. [Online] [Zitat vom: 27. 04 2017.] [http://www.see.uni-rostock.de/uploads/media/Teil\\_5\\_Transformator.pdf](http://www.see.uni-rostock.de/uploads/media/Teil_5_Transformator.pdf).
30. **Adolf J. Schwab, Wolfgang Kürner.** *Elektromagnetische Verträglichkeit.* s.l. : Springer, 2010.
31. **Hendrik Cosemans, General Manager.** Properties behind effective Transformer Oil Cooling. *Transformer-Life-Management Conference.* 2017.
32. **Krikava F., Ruhswurm H., Seiser J.** *Grundlagen der Elektrotechnik Band 1.* Wien : R. Oldenbourg GesmbH , 1996. ISBN 3-7029-0707-6.
33. **Paul S., Paul R.** *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1.* s.l. : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-540-69076-4.
34. **Hering E., Martin R., Stohrer M.** *Physik für Ingenieure.* s.l. : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-71855-0.
35. **G, Fasching.** *Werkstoffe für die Elektrotechnik.* s.l. : Springer-Verlag Wien, 2005. ISBN 3-211-22133-6.
36. **V., Moser H.P Dahinden.** *Transformerboard II.* Rapperswil : H. Weidmann AG,, 1987.
37. [Online] [Zitat vom: 29. 06 2017.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A4t>.
38. [Online] 29. 06 2017. <https://de.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A4t>.
39. **60422, ÖVE/ÖNORM EN.** Richtlinien zur Überwachung und Wartung von Isolierölen auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln. 2007-04-01.
40. **W., Weißgerber.** *Elektrotechnik für Ingenieure 2.* Wiesbaden : Vieweg & Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2009. ISBN 978-3-8348-0474-7.
41. **Krikava F., Ruhswurm H., Seiser J.** *Grundlagen der Elektrotechnik Band 2.* 1995 : R. Oldenbourg GesmbH , Wien. ISBN 3-7029-0705-X.
42. **R, Kotte.** *Untersuchung zur elektrotechnischen Nutzung hochwärmebeständiger Reaktionsharzformstoffe.* s.l. : Cuvillier Verlag Göttingen, 2005. ISBN 3-86537-669-X.
43. **D., Zastrow.** *Elektrotechnik.* Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2000. ISBN 3-528-44034-1.
44. **Ölbuch.** Isolierflüssigkeiten . Frankfurt/Main : VWEW, 1983.
45. **W., Gretler.** Strömungslehre Vorlesungsskriptum . Insitut für Strömungslehre und Gasdynamik, Technische Universität Graz : s.n., 1987. 5.Ausgabe.

46. **W.Gertler.** Wärmeübertragung . *Vorlesungsskriptum*. Institut für Strömungslehre und Gasdynamik TU-Graz : s.n.
47. **Ernst, Pagger.** Alternative Isolierflüssigkeiten im Vergleich zum klassischen Mineralöl. Technische Universität Graz : s.n., Mai 2013.
48. [Online] [tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916466.2012.757235](http://tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916466.2012.757235).
49. **O.O.Fasina und Z.Colley.** Viscosity and specific heat of vegetable oils as a function of temperature: 35°C to 180°C. *International Journal of Food Properties*. 2008, 11, S. 738-746.
50. **Checker, Öl.** Wearcheck Schmierstoff Analysen. 2007.
51. **Reid Robert C., Prausnitz John M., Polling Bruce E.** The Properties of Gases & Liquids. 1987. 4 Kapitel 9.
52. <http://www.ph.tum.de/studium/praktika/ap/versuche/vis/vis.pdf>. [Online] [Zitat vom: 5. 5 2017.]
53. <http://polyphys-s01.ethz.ch/pub/MR/aprints/pmk501preprint.pdf> . [Online] [Zitat vom: 5. 5 2017.]
54. *Brockhaus ABC Chemie*. Leipzig : Brockhaus Verlag, 1965.
55. **G., Hegemann.** *Midel 7131 – Eine Isolier- und Kühlflüssigkeit für Transformatoren mit niedrigem toxischen und ökologischen Potential*. Hamburg : BASF Lacke und Farben, Erscheinungsjahr unbekannt.
56. **Eberhardt, Dipl. Ing. Robert.** Elektrische Eigenschaften und Gasungsverhalten von biologischen und synthetischen Estern in Hochspannungsisolationssystemen unter Kälteeinfluss. TU Graz : s.n., 2011.
57. **Midel, M&I.** [www.midel.com](http://www.midel.com). *Midel 7131 Technisches Datenblatt*. [Online]
58. <http://de.wikipedia.org/wiki/Pflanzenöl-Kraftstoff>. *Brennwert von Sojaöl*. [Online]
59. **Napthenics Nynas.** Product Data Sheet Nytro 4000X. Schweden : Nynas Napthenics, 28.3.2008.
60. **Systems, Cooper Power.** *Envirotemp FR3 Fluid Product Information*. Waukesha USA : Cooper Power Systems, 2005.
61. **Systems, COOPER Power.** Recommended retrofill procedures for the replacement of oil with Envirotemp® FR3™ Fluid. Bulletin S900-20-2, Februar 2004.
62. **ELANTAS.** Electrical Insulation; Retrofilling. 01/2010, Arbeitsanweisung .

63. **G., Newesely.** High Grad- Isolieröl- hinausgeworfenes Geld oder eine gute Investition. 11. November 2005. Bd. 122. Jahrgang, e&i Heft.
64. **AB, Nynäs Naphthenics.** Transformer oil handbook. Schweden : s.n., 2004.
65. **Martin D., Khan I., Dai J., Wang Z. D.** *An overview of the suitability of vegetable oil dielectrics for use in large power transformers.* University of Manchester : s.n., 2006.
66. **M., Corlos, Gutierrez und Cresanti, Robert C.** [Online] [Zitat vom: 18. 7 2017.]
67. **VDEW, Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke –.** Isolierflüssigkeiten, Anforderung-Prüfungen-Überwachung und Wartung- Empfehlungen für den Betrieb. *VDEW-Ölbuch.* Bd. 2, 1996.
68. **Pukel, Georg.** Dr. Siemens Weiz- Entwicklungsabteilung, 24. 06 2017.
69. [Online] [Zitat vom: 1. 05 2017.] <http://www.seilnacht.com/versuche/cus.html>.
70. [Online] 27. 06 2017. [http://www.oelheld.de/fileadmin/content/pages/Innovation/pdf-Wissenschaftliche\\_Berichte/Basisfl%C3%BCssigkeiten.pdf](http://www.oelheld.de/fileadmin/content/pages/Innovation/pdf-Wissenschaftliche_Berichte/Basisfl%C3%BCssigkeiten.pdf).
71. [Online] 02. 07 2017. <http://www.ralicks.de/deutsch/werkstoff.htm>.
72. **Midel.** [Online] [Zitat vom: 07. 07 2017.] <http://www.midel.com/de/productsmidel/midel-7131/asset-life-extension>.
73. **COOPER POWER SYSTEMS.** *Bulletin R900-20-4.* 2003.
74. [Online] [Zitat vom: 11. 7 2017.] <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/r/reynoldszahl.htm>.
75. [Online] [Zitat vom: 30. 04 2017.] <http://docplayer.org/11853469-Druck-kraft-pro-flaeche.html>.
76. **McLean, Hazel.** Siemens Bericht Megacities und ihre Herausforderungen. [Online] [Zitat vom: 22. 04 2017.] [http://www.siemens.com/pool/de/uber\\_uns/megacities/MegaCity-](http://www.siemens.com/pool/de/uber_uns/megacities/MegaCity-)  
.
77. **Hart, Dave.** Dielectric Fluids for Transformer Cooling (History and Types). 2005.
78. **Kraif, Ursula.** *Duden - Fremdwörterbuch.* Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus : Dudenverlag, 2005.
79. **C., Sumeder.** *Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik.* s.l. : Österreichischer Verband für Elektrotechnik Wien, 2010. ISBN 978-3-85133-058-8.

80. **Systems, COOPER Power.** Transformer options for fire sensitive locations. Bulletin 92005, Juni 2001.

81. [http://www.chemie.de/lexikon/Dissoziation\\_\(Chemie\).html](http://www.chemie.de/lexikon/Dissoziation_(Chemie).html). [Online] [Zitat vom: 7. 5 2017.]

82. [Online] [Zitat vom: 17. 05 2017.] [de.wikipedia.org/wiki/Semipermeabilität](http://de.wikipedia.org/wiki/Semipermeabilität).

83. [Online] [Zitat vom: 17. 05 2017.] <http://www.lci-koeln.de/deutsch/veroeffentlichungen/lci-focus/headspace-technik-in-der-gaschromatographie>.

84. **EDUR-Kreiselpumpen.** Projektierungsgrundlagen. *Grundlagen für die Projektierung und den Betrieb von EDUR-Kreiselpumpenanlagen.*







## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Graz, den 25.Juli 2017

Martin Gruber